

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

ANALÝZA ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE ASYNCHRONNÍHO
STROJE

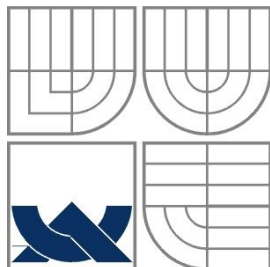
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JOSEF ADAMEC

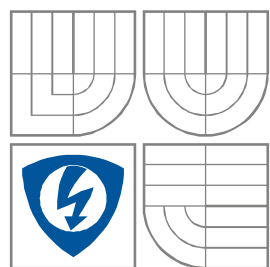
BRNO 2012

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

ANALÝZA ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE ASYNCHRONNÍHO STROJE

ANALYSIS OF THE ELEKTROMAGNETIC FIELD IN THE INDUCTION MACHINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE

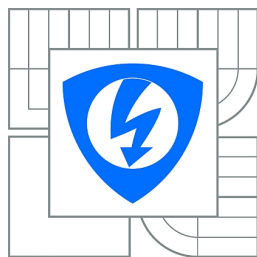
AUTHOR

Josef Adamec

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Michailidis



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoprúdová elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Josef Adamec

ID: 119345

Ročník: 3

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Analýza elektromagnetického pole asynchronního stroje

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Vytvořte model asynchronního stroje v programu Ansys RMXprt a exportujte 2D model do programu Ansys Maxwell.
2. Proveďte transientní simulaci vyexportovaného stroje při jmenovitém zatížení a to včetně poruchových stavů (přerušení několika rotorových tyčí).
3. Na základě provedených simulací analyzujte průběhy.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle pokynů vedoucího

Termín zadání: 21.9.2011

Termín odevzdání: 31.5.2012

Vedoucí práce: Ing. Petr Michailidis

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Bakalářský projekt se zabývá analýzou elektromagnetického pole v asynchronním motoru s kotvou nakrátko. Jako hlavní metoda je použita metoda konečných prvků. Cílem bakalářského projektu je provést analýzu asynchronního motoru s kotvou nakrátko v programu Ansoft Maxwell.

Klíčová slova

Ansoft Maxwell; asynchronní stroj; konečnoprvková síť; Maxwellovy rovnice; metoda konečných prvků; porušení rotorových tyčí; rozložení magnetické indukce; rozložení siločar; magnetická indukce; uzel; vektorové rozložení magnetické indukce; vinutí

Abstract

Bachelor's project deals with the analysis of the electromagnetic fields in the induction motor with squirrel cage. The main method used is the method of finite elements. The aim of the bachelor project is to analyze induction motor with squirrel cage in the Ansoft Maxwell.

Keywords

Ansoft Maxwell; distribution of field lines; distribution of magnetic induction; Finite Element Method; Flux Density; induction machine; Maxwell's equations; Mesh; Node; vector distribution of magnetic induction; violation of rotor bars; Winding

Bibliografická citace

ADAMEC, J. Analýza elektromagnetického pole asynchronního stroje. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 47 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Michailidis.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou semestrální práci na téma Simulování modelů elektromagnetických polí v elektrických strojích jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené semestrální práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu semestrální práce Ing. Petru Michailidisovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé semestrální práce.

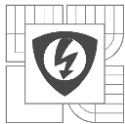
V Brně dne

Podpis autora



Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	3
SEZNAM TABULEK	4
SEZNAM ROVNIC.....	5
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	6
ÚVOD	7
1. POČÍTAČOVÉ METODY ŘEŠENÍ ELEKTROMAGNETICKÝCH POLÍ.....	8
1.1. METODA KONEČNÝCH PRVKŮ.....	8
1.2. METODA KONEČNÝCH DIFERENCÍ (METODA SÍTÍ)	9
1.3. METODA HRANIČNÍCH PRVKŮ	9
2. MAGNETISMUS.....	11
2.1. MAGNETICKÉ POLE	11
2.2. MAGNETICKÁ INDUKCE.....	12
2.2.1. FLEMINGOVO PRAVIDLO LEVÉ RUKY.....	13
2.3. MAXWELLOVY ROVNICE	13
2.3.1. AMPÉRŮV-MAXWELLŮV ZÁKON	14
2.3.2. FARADAYŮV ZÁKON	14
2.3.3. GAUSSŮV ZÁKON PRO ELEKTRICKÉ POLE.....	14
2.3.4. GAUSSŮV ZÁKON PRO MAGNETICKÉ POLE	14
2.4. MAGNETICKÁ SÍLA	14
2.5. PRAVIDLO PRAVÉ RUKY (AMPÉROVO PRAVIDLO).....	16
2.6. MAGNETICKÉ POLE PŮSOBÍCÍ NA PROUDOVOU SMYČKU.....	16
3. ELEKTRICKÉ STROJE	17
3.1. ROZDĚLENÍ ELEKTRICKÝCH STROJŮ	17
3.2. ASYNCHRONNÍ STROJE	18
3.2.1. KONSTRUKCE ASYNCHRONNÍHO STROJE.....	18
3.2.2. PRINCIP ASYNCHRONNÍHO STROJE	19
3.2.3. ZAPOJENÍ TROJFÁZOVÉHO STATOROVÉHO VINUTÍ	21
3.2.4. NÁHRADNÍ SCHÉMA ASYNCHRONNÍHO MOTORU	21
3.2.5. ASYNCHRONNÍ MOTOR PŘI CHODU NAPRÁZDNO	22
3.2.6. ASYNCHRONNÍ MOTOR VE STAVU NAKRÁTKO	22
4. PROGRAMOVÉ VYBAVENÍ.....	23
4.1. ANSOFT MAXWELL 14.....	23
4.1.1. PRACOVNÍ PROSTŘEDÍ	23
4.1.2. RMXprt DESIGN	24
5. VYTVOŘENÍ SIMULACE MAGNETICKÉHO OBVODU ASYNCHRONNÍHO MOTORU ...	25
5.1. TABULKA ŠTÍTKOVÝCH HODNOT ASYNCHRONNÍHO MOTORU	25
5.2. TVORBA MODELU.....	25



5.3. DEFINICE MATERIALŮ	28
5.4. NASTAVENÍ SIMULACE MODELU	29
6. ANALÝZA ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ.....	30
6.1. GRAFY.....	30
6.2. VEKTOROVÉ ROZLOŽENÍ MAGNETICKÉ INDUKCE	33
6.3. ROZLOŽENÍ MAGNETICKÉ INDUKCE	35
6.4. ROZLOŽENÍ SILOČAR.....	37
ZÁVĚR.....	40
LITERATURA	41



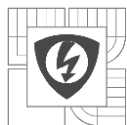
SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1.1-1: Metoda konečných prvků.....</i>	<i>9</i>
<i>Obrázek 1.3-1: Metoda hraničních prvků</i>	<i>10</i>
<i>Obrázek 2.1-1: Magnetické pole</i>	<i>12</i>
<i>Obrázek 2.2-1: Magnetická indukce a Flemingovo pravidlo levé ruky</i>	<i>13</i>
<i>Obrázek 2.4-1: Magnetická síla</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 2.5-1: Pravidlo pravé ruky.....</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 3.1-1: Diagram rozdělení elektrických strojů.....</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 3.2-1: Diagram konstrukce asynchronního stroje</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 3.2-2: Tvar statorového a rotorového plechu.....</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 3.2-3: Rotorová klec motoru nakrátko.....</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 3.2-4: Řez uzavřeným asynchronním kroužkovým motorem.....</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 3.2-5: Zapojení svorkovnice asynchronního motoru</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 3.2-6: Náhradní schéma asynchronního motoru</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 4.1-1: Pracovní prostředí Ansoft Maxwell 14</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 5.2-1: Okótovaný náčrt pro tvorbu statorové drážky</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 5.2-2: Zapojení statorového vinutí.....</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 5.2-3: Návrh rotoru.....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 5.2-4: Vytvoření drážky pro rotorovou klec.....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 5.3-1: B-H křivka steel M54</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 5.4-1: Navrhnutý 2D model asynchronního stroje</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 6.2-1: Vektorové rozložení magnetické indukce - normální</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 6.2-2: Vektorové rozložení magnetické indukce - Fault 2</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 6.2-3: Vektorové rozložení magnetické indukce - Fault 4</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 6.2-4: Vektorové rozložení magnetické indukce - Fault 14</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 6.3-1: Rozložení magnetické indukce – normální.....</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 6.3-2: Rozložení magnetické indukce – Fault 2</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 6.3-3: Rozložení magnetické indukce – Fault 4.....</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 6.3-4: Rozložení magnetické indukce – Fault 14.....</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 6.4-1: Rozložení siločar - normální</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 6.4-2: Rozložení siločar - Fault 2</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 6.4-3: Rozložení siločar - Fault 4</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 6.4-4: Rozložení siločar - Fault 14</i>	<i>39</i>



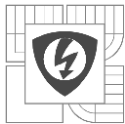
SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 4.1.2-1: Parametry asynchronního stroje</i>	<i>25</i>
<i>Tabulka 4.1.2-1: B-H křivka steel_M54.....</i>	<i>28</i>



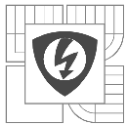
SEZNAM ROVNIC

(2.2.1-1) Biotův-Savartův zákon.....	12
(2.2.1-2) Magnetická síla	13
(2.2.1-3) Magnetická síla v závislosti na úhlu α	13
(2.3.1-1) Tok elektrické intenzity.....	14
(2.3.1-2) Ampérův-Maxwellův zákon	14
(2.3.2-1) Tok magnetické indukce	14
(2.3.2-2) Faradayův zákon	14
(2.3.3-1) Gaussův zákon pro elektrické pole.....	14
(2.3.4-1) Gaussův zákon pro magnetické pole	14
(2.3.4-1) Magnetické pole působící na proudovou smyčku.....	16
(3.2.2-1) Synchronní otáčky	20
(3.2.2-2) Skluz asynchronního motoru	20
(3.2.2-3) Otáčky na rotoru asynchronního motoru	20
(3.2.2-4) Otáčky točivého magnetického pole rotoru.....	20
(3.2.2-5) Frekvence napětí a proudu v rotoru.....	21
(3.2.4-1) Efektivní hodnota napětí ve vinutí statoru.....	22
(3.2.4-2) Efektivní hodnota v jedné fázi vinutí rotoru	22
(3.2.4-3) Převod mezi statorem a rotorem	22
(3.2.4-4) Přepočet indukovaného napětí	22
(3.2.4-5) Přepočet proudu.....	22
(3.2.4-6) Přepočet rezistivity.....	22
(3.2.4-7) Přepočet rozptylové reaktance	22
(3.2.4-8) Rozptylová reaktance rotoru v závislosti na skluzu.....	22
(3.2.4-9) Přepočítaný proud v rotoru na stator.....	22



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Φ_B	tok magnetické indukce	Wb
Φ_E	tok elektrické intenzity	Vm
ε_0	permitivita vakua	Fm ⁻¹
μ_0	permeabilita vakua	Hm ⁻¹
B	magnetická indukce	T
E	elektrická intenzita	Vm ⁻¹
f_1	frekvence napětí a proudu ve statoru	Hz
f_2	frekvence napětí a proudu v rotoru	Hz
F_m	magnetická síla	N
I	elektrický proud	A
I_1	statorový proud	A
I_2'	proud rotoru přepočtený na stator	A
I_{Fe}	činná složka proudu naprázdno	A
I_μ	magnetizační proud	A
k_{v1}	činitel vinutí statoru	-
k_{v2}	činitel vinutí rotoru	-
l	délka	m
L_2	indukčnost rotoru	H
M	moment	Nm
m	magnetický dipólový moment	-
N	počet závitů cívky	-
n	otáčky rotoru asynchronního motoru	min ⁻¹
N_1	počet závitů jedné fáze statoru	-
n_2	otáčky točivého magnetického pole rotoru	min ⁻¹
n_s	synchronní otáčky	min ⁻¹
p	počet pólových dvojic	-
Q	náboj	C
R_1	rezistivita statoru	Ω
R_2'	rezistivita rotoru přepočtená na stator	Ω
R_{Fe}	rezistivita respektující ztráty v železe	Ω
S	plocha	m ²
s	skluz	-
U_{ind1}	efektivní hodnota napětí ve vinutí statoru	V
U_{ind2}	efektivní hodnota napětí v jedné fázi vinutí rotoru	V
X_h	magnetizační reaktance	Ω
$X_{\sigma 1}$	rozptylová reaktance statoru	Ω
$X_{\sigma 2}'$	rozptylová reaktance rotoru	Ω
$X_{\sigma 2s}$	rozptylová reaktance rotoru v závislosti na skluzu	Ω



ÚVOD

Vývoj elektrotechnických zařízení a i ostatních strojů vyžaduje obrovské náklady a spoustu času. Musí se provést množství výpočtů, testování, vytvořit prototyp. Z těchto důvodů se hledají cesty jak tento proces urychlit. Využití simulačních programů ve vývoji zařízení je jednou z cest, která se spolu s rozvojem výpočetní techniky objevila. Druhů počítačové simulace je velké množství. Je možné říci, že cokoliv, co můžeme popsat, lze také simulovat pomocí počítače. Popisem se má na mysli proces rozčlenění jevu na základní samostatné prvky, kterým lze přiřadit určité hodnoty a určitý počet pravidel, podle kterých se tyto prvky mezi sebou chovají. Při zpracovávání výsledků však nesmíme zapomenout na to, že vše má své hranice. Proto musíme stále uvažovat nad možnými chybami, které můžeme způsobit sami nesprávným nastavením parametrů simulace a nespolehat pouze na dokonalost výpočetní techniky.

Počítačová simulace byla vyvinuta ruku v ruce s rychlým rozvojem počítačů. První velké nasazení bylo v Manhattanském projektu ve druhé světové válce na procesní model jaderného výbuchu. Jednalo se o simulaci 12 těžkých koulí pomocí algoritmu Monte Carlo. Analýzy vytvořené pomocí výpočetní techniky se dříve užívali pouze jako doplněk k řešenému problému. Postupem času se ale počítačová simulace rozšířila do takové míry, že se s ní setkáváme doslova na každém kroku.

Semestrální práce se zabývá pouze jedním ze zástupců simulačních programů. Program Ansoft Maxwell používá metody konečných prvků k řešení trojrozměrných a dvourozměrných simulací, zabývající se elektrickou a magnetostatickou analýzou, modelováním vířivých proudů a řešením přechodových dějů. V práci využijeme Maxwell k analýze elektromagnetického pole asynchronního stroje.

1. POČÍTAČOVÉ METODY ŘEŠENÍ ELEKTROMAGNETICKÝCH POLÍ

Pro simulaci rozložení elektromagnetického pole se nejčastěji využívá výkonné výpočetní techniky s profesionálními programy určenými k výpočtům pomocí numerických metod. Při výpočtech se využívá tři numerických metod a to *metody konečných prvků (1.1)*, *konečných diferencí (metoda sítí) (1.2)* a *hraničních prvků (1.3)*. V případě simulací elektromagnetických polí se převážně využívá numerická metoda konečných prvků. V praxi je tento způsob řešení spojen s počátečními vysokými náklady na software. Na výpočetní techniku jsou ovšem kladeny také velké nároky hlavně z hlediska kapacity RAM paměti. Při simulaci je také velmi důležité s ohledem náročnost zvolit správný poměr mezi časem potřebným k výpočtu a jeho přesností. Přesnost simulace určuje počet uzlů, které se nazývají NODY, v kterých dochází k výpočtu. Vzájemným propojením těchto NODů vznikne síť čar, kterou nazýváme MESH. V případě řešení 2D simulace bývají počty NODů relativně malé a čas výpočtu je tak i krátký. Naopak řešením 3D simulací se zvedne počet NODů o třetí mocninu. Příkladem může být simulace krychle. V 2D se počítá 100 NODů, ale ve 3D nám počet NODů vzroste s třetí mocninou na 1000. Tím se kladou na výpočetní techniku o mnoho větší nároky a vzroste tak doba potřebná k simulaci i nutnost větší kapacity RAM paměti.

1.1. Metoda konečných prvků

Je moderní, vysoce efektivní numerickou metodou pro řešení technických a vědeckých úloh. Metoda konečných prvků (dále jen jako MKP) se považuje za jednu z nejlepších přibližných metod zajišťujících řešení problémů, které se dají popsat diferenciálními rovnicemi. Slouží například k simulaci deformací, proudění tepla nebo tvaru siločar.

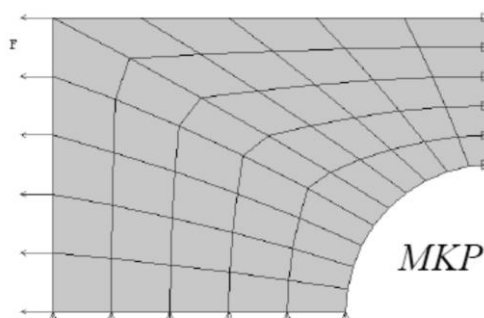
Tuto metodu formuloval v roce 1943 Richard Courant a asi o 10 let později ji objevili američtí inženýři a začali ji využívat při provádění pevnostních výpočtů v leteckých konstrukcích. Systematické teoretické studium MKP (FEM) začalo až v šedesátých letech. V roce 1968 dokázal jako první konvergenci MKP brněnský profesor Miloš Zlámal (1924 – 1997).

Při simulaci se z matematického hlediska postupuje tak, že se nejprve simulované těleso rozdělí na konečný počet jednotlivých oblastí, což jsou pro rovinnou úlohu většinou trojúhelníky či čtyřúhelníky a pro prostorové úlohy čtyřstěny, pětistěny, kvádry apod. To znamená vytvoření MESH. Pak se minimalizuje odpovídající potencionální energie na množině spojitých a po částech polynomických funkcí nad již vytvořenou MESH převedením této úlohy na soustavu lineárních popř. nelineárních algebraických rovnic, jejíž matice obsahuje většinou nulové prvky. To snižuje nároky na paměť počítače a počet prováděných aritmetických operací. Takto můžeme již v současnosti řešit obrovské soustavy až o miliónech rovnic a neznámých na počítačích s paralelní architekturou. Pokud je úloha nelineární, její řešení se většinou převádí na posloupnost lineárních rovnic. Hlavní výhodou MKP je, že celý výpočtový proces lze na počítačích zautomatizovat:

- Interpolace vstupních dat
- Generování MESH
- Sestavení soustavy algebraických rovnic
- Vyřešení soustavy algebraických rovnic

- Vyhazení numerického řešení
- Aposterioerní odhady chyby
- Grafické znázornění výsledků

Těchto sedm bodů je implementováno v nepřehledném množství souborů programů, které vytvářejí uživatelsky příjemné prostředí pro zadání úlohy spolu s kontrolou vstupních údajů (např. v programu Maxwell, který je využit k simulaci magnetického pole). Zjemňování sítě probíhá buď interaktivně, kdy si uživatel sám volí oblasti, kde chce získat lepší aproximaci řešení, nebo adaptivně (tj. bez zásahu člověka). V tomto druhém případě počítač sám vyhodnocuje velikost chyby na jednotlivých prvcích, které pak případně dále rozděluje. Příslušná výstupní data jsou pak ve formě izolinií, různě obarvených, stínovaných či vyšrafovaných ploch. Vývoj směrem k osobním počítačům a CAD systémům ještě zvýšil význam této metody, která je dnes začleňována do CAD systémů a tvoří jeden ze základních bloků moderního počítačového navrhování.



Obrázek 1.1-1: Metoda konečných prvků

1.2. Metoda konečných diferencí (metoda sítí)

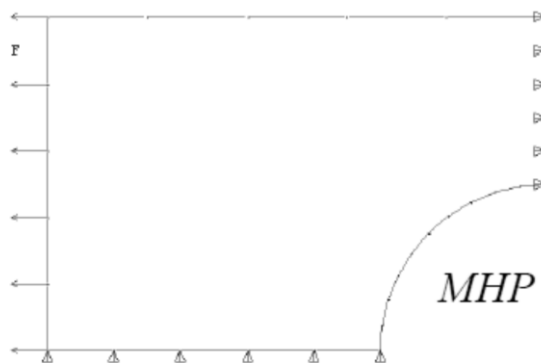
Podstatou metody konečných diferencí je pokrytí oblasti, v níž se hledá řešení diferenciální rovnice, sítí, která se skládá z konečného počtu uzlových bodů. V každém bodě sítě se nahradí derivace v těchto uzlových bodech příslušnými diferencemi, tj. lineárními kombinacemi funkčních hodnot v okolních bodech. V závislosti na tom, zda volíme difference dopředné či zpětné, dostáváme různé typy metody sítí (metody explicitní, implicitní). Po záměně derivací diferencemi ve všech uzlových bodech vznikne soustavu lineárních algebraických rovnic s neznámými hodnotami posunů v těchto uzlových bodech.

Mezi nevýhody této metody však patří problém s aproximací okrajových podmínek na jednotlivých částech hranic, zhoršení přesnosti aproximovaného řešení pro síť s různým odstupem uzlů a konečně nezbytnost relativně hustého časového kroku. Každá geometrie musí být pro potřeby výpočtů rozdělena na síť. Prostorová (geometrická) síť je tvořena skupinou samostatných bodů v určité oblasti.

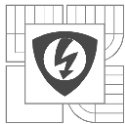
1.3. Metoda hraničních prvků

Podstatnou výhodou Metody hraničních prvků je snížení náročnosti na výpočetní techniku a to především při řešení prostorových modelů. Tohoto snížení se dosahuje pomocí snížení

dimenze úlohy, neboť se diskretizuje nikoliv celá uvažovaná oblast, ale pouze její hranice. To se ale odráží v potřebě řešit touto metodou pouze tělesa s předpokládaným vnitřním homogenním prostředím. Na každém hraničním prvku se aproximuje přesné řešení úlohy z uzlových bodů pomocí interpolačních funkcí. Po vyřešení odpovídající soustavy rovnic pro neznámé hodnoty na hranicích oblasti se odpovídající hodnoty uvnitř oblasti stanoví analyticky na základě tzv. fundamentálního řešení. Takový způsob řešení nám také umožňuje řešit úlohy v prostorově neomezených polích, což v metodě konečných prvků divergovalo ke špatnému výsledku nebo vyžadovalo obrovské nároky na operační paměť počítače. Při použití této metody je ovšem nutné znát fundamentální řešení.



Obrázek 1.3-1: Metoda hraničních prvků



2. MAGNETISMUS

2.1. Magnetické pole

Již ze starověku je známé vzájemné silové působení některých nerostů. H. Ch. Oersted roku 1820 zjistil, že magnetka v blízkosti vodiče protékaného proudem se vychýlí ze směru určeného zemským magnetickým polem, čímž ověřil hypotézu vzájemné souvislosti elektřiny a magnetismu. Silové působení mezi dvěma vodiči, kterými protéká proud, experimentálně prokázal A. M. Ampère.

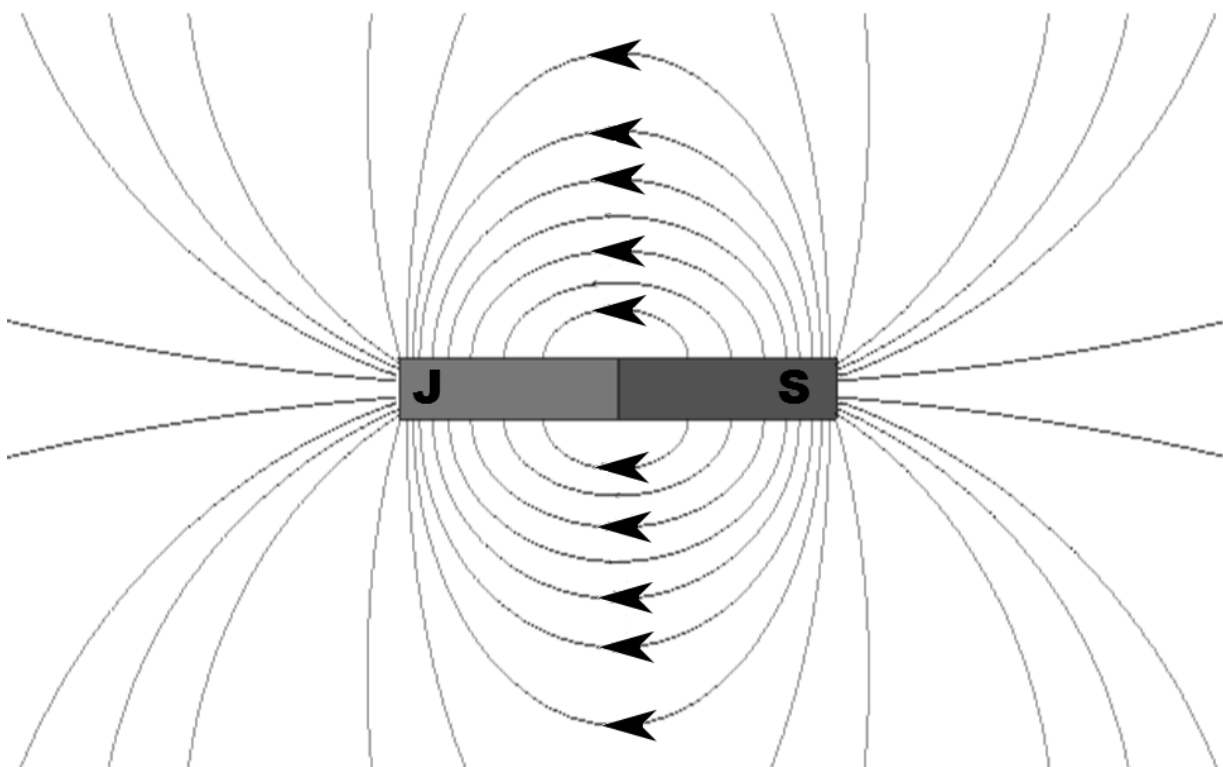
Zdrojem magnetického pole jsou zmagnetovaná tělesa (např. permanentní magnety, elektromagnety), pohybující se nabitě částice a makroskopické elektrické proudy. Magnetické pole se projevuje účinky magnetických sil na zmagnetovaná tělesa, vodiče s proudem a pohybující se nosiče elektrického náboje. Magnetická síla je ve skutečnosti jednou složkou síly elektromagnetické, druhou složkou je síla elektrická.

Magnetické pole dělíme v závislosti na čase na:

- *stacionární* – neměnné v čase
 - *magnetostatické* – případ stacionárního magnetického pole, ve kterém se nevyskytují volné elektrické proudy
- *nestacionární* – časově proměnné

Kvantitativní mírou magnetického pole je vektorová fyzikální veličina magnetická indukce \mathbf{B} . Magnetické pole zobrazujeme pomocí magnetických indukčních čar. Magnetické pole, jehož magnetické indukční čáry jsou rovnoběžky, se nazývá homogenní magnetické pole.

Zmagnetovaná tělesa mají na svém povrchu dvě místa – severní a jižní pól magnetu, na nichž se nejvíce projevují magnetické vlastnosti. Vzájemná poloha zmagnetovaných těles určuje charakter silové interakce. Jestliže budou k sobě přiléhat opačné póly magnetu, projeví se přitažlivé působení sil a naopak.



Obrázek 2.1-1: Magnetické pole

2.2. Magnetická indukce

Magnetická indukce \mathbf{B} je vektorová fyzikální veličina vyjadřující silové účinky magnetického pole na nabitě částice. Je definována pomocí síly \mathbf{F}_B působící na zkušební částici s nábojem Q , která se pohybuje rychlostí \mathbf{v} v magnetickém poli.

$$\mathbf{F}_B = Q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (2.2.1-1)$$

Jednotkou magnetické indukce B je tesla [T]: $1\text{T}=1\text{NA}^{-1}\text{m}^{-1}$

Vloží-li se do homogenního magnetického pole vodič kolmo k indukčním čarám tohoto pole, zjistíme, že velikost magnetické síly je přímo úměrná:

- proudu, který prochází vodičem
- délce části vodiče vloženého do magnetického pole

Lépe se to vysvětlí pomyslným rozdělením vodiče na více malých částí. Výslednou magnetickou sílu potom určí výslednice dílčích magnetických sil od těchto malých částí.

Poté tedy platí:

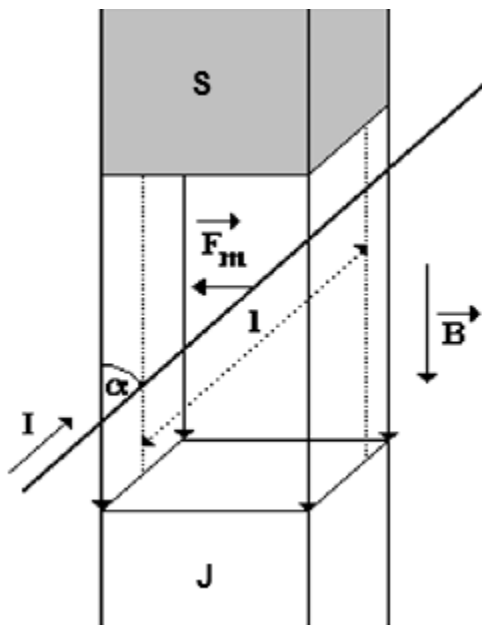
$$\mathbf{F}_m = \mathbf{B} \cdot \mathbf{l} \cdot l \quad (2.2.1-2)$$

kde veličina \mathbf{B} má význam konstanty úměrnosti a charakterizuje silové působení magnetického pole na vodič s proudem. V homogenním magnetickém poli má stále stejnou velikost a spolu se směrem magnetických indukčních čar určuje vektorovou veličinu \mathbf{B} , tj. magnetickou indukci.

Pokud by byl vodič umístěn do homogenního magnetického pole rovnoběžně s indukčními čarami, silové působení by nenastalo $\mathbf{F}_m = \mathbf{0}$. Velikost magnetické síly závisí tedy na úhlu, který svírá vodič s indukčními čarami magnetického pole:

$$\mathbf{F}_m = \mathbf{B} \cdot \mathbf{l} \cdot l \cdot \sin \alpha \quad (2.2.1-3)$$

kde $\alpha \in < 0; \pi >$. Magnetická síla \mathbf{F}_m je kolmá jak na vodič, tak na magnetickou indukci a tím i na magnetické indukční čáry.



Obrázek 2.2-1: Magnetická indukce a Flemingovo pravidlo levé ruky

2.2.1. Flemingovo pravidlo levé ruky

Nastaví-li se levá ruka tak, aby indukční čáry magnetického pole vstupovaly od severního pólu kolmo do dlaně a natažené prsty ukazovaly směr proudu ve vodiči, pak vztyčený palec ukazuje směr síly \mathbf{F}_m vychylující vodič.

2.3. Maxwellovy rovnice

Je to soubor čtyř parciálních diferenciálních rovnic, které popisují vlastnosti elektřiny a magnetických polí a vztahují je k jejich zdrojům, hustotě náboje a proudové hustotě. Lze je psát v integrálním, nebo diferenciálním tvaru. V integrálním tvaru popisují elektromagnetické pole v určité oblasti, kdežto v diferenciálním tvaru v jednom bodu této oblasti. Lze z nich odvodit všechny rovnice, které popisují elektrické, magnetické nebo elektromagnetické pole.

2.3.1. Ampérův-Maxwellův zákon

Vyjadřuje souvislost mezi cirkulací magnetické indukce \mathbf{B} podél uzavřené orientované křivky a časovou změnou toku elektrické intenzity \mathbf{E} plochou ohraničenou touto křivkou a celkovým proudem procházejícím touto plochou.

$$\Phi_E = \int \mathbf{E} \times d\mathbf{S} \quad (2.3.1-1)$$

$$\oint \mathbf{B} \times d\mathbf{S} = \mu_0 \left(\varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} + I_C \right) \quad (2.3.1-2)$$

Kde μ_0 je permeabilita vakua, ε_0 permitivita vakua, Φ_E tok elektrické intenzity a I_C je celkový proud.

2.3.2. Faradayův zákon

Nebo také Zákon elektromagnetické indukce vyjadřuje vztah mezi cirkulací intenzity elektrického pole \mathbf{E} podél uzavřené orientované křivky a časovou změnou indukčního magnetického toku Φ_B plochou ohraničenou touto křivkou.

$$\Phi_B = \int \mathbf{B} \times d\mathbf{S} \quad (2.3.2-1)$$

$$\oint \mathbf{E} \times d\mathbf{S} = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (2.3.2-2)$$

2.3.3. Gaussův zákon pro elektrické pole

Vyjadřuje vztah mezi intenzitou elektrického pole \mathbf{E} na uzavřené Gaussově ploše a celkovým nábojem Q , který je touto plochou obklopen a platí obecně pro libovolné vektorové pole, nejen pro pole elektrostatické.

$$\oint \mathbf{E} \times d\mathbf{S} = \frac{Q}{\varepsilon_0} \quad (2.3.3-1)$$

2.3.4. Gaussův zákon pro magnetické pole

Vyjadřuje poznatek, že tok magnetické indukce \mathbf{B} libovolnou uzavřenou plochou se rovná nule (tj. neexistuje magnetický náboj, nebo-li monopol).

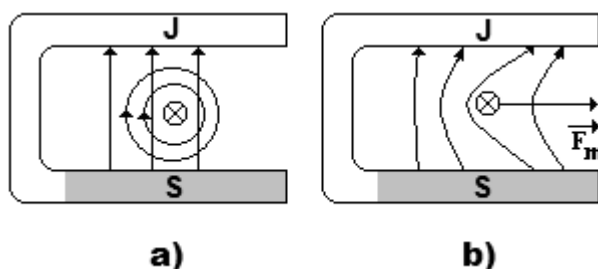
$$\oint \mathbf{B} \times d\mathbf{S} = 0 \quad (2.3.4-1)$$

2.4. Magnetická síla

Silové působení je charakteristickým rysem každého fyzikálního pole. U gravitačního pole se jedná o newtonovskou sílu, u pole elektrického o sílu coulombovskou. Podobně je tomu i

u pole magnetického, kde jeho základním projevem je silové působení na vodič s proudem. O existenci magnetické síly F_m se můžeme přesvědčit pokusem. Mezi dvěma póly magnetu se nachází pohyblivě umístěný vodič, který se připojí ke zdroji napětí. Podle směru proudu ve vodiči, orientace magnetických indukčních čar a polarity magnetu se vodič vychýlí buď na jednu stranu, nebo na druhou (viz obrázek 2.4-1).

Příčinou vychýlení vodiče je vzájemné působení magnetu a vodiče s proudem prostřednictvím jejich magnetických polí. Vlevo od vodiče jsou magnetické indukční čáry obou polí orientovány souhlasně, zatímco vpravo od něj opačně. Vzniká tedy nesouměrné rozložení magnetických indukčních čar v okolí vodiče. Složením obou polí vzniká pole výsledné s větší hustotou indukčních čar vlevo a menší hustotou vpravo od vodiče. To se projeví vznikem magnetické síly F_m , která působí na vodič a míří do místa s menší hustotou magnetických indukčních čar. Při změně směru proudu nebo orientace magnetických indukčních čar magnetu se změní i orientace magnetické síly.

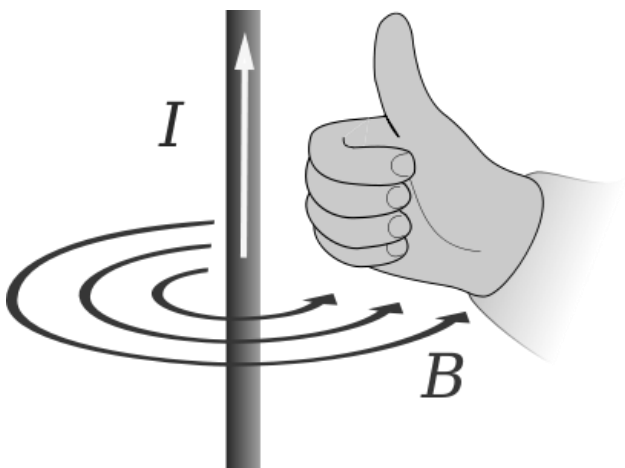


Obrázek 2.4-1: Magnetická síla

V případě, že bude vodič svírat s indukčními čarami libovolný jiný úhel než kolmý, bude silové působení na vodič vždy menší. Velikost magnetické síly bude nulová, pokud bude vodič rovnoběžný s magnetickými indukčními čarami. Tohoto jevu se v technické praxi využívá v případě, kdy mezi póly magnetu umístíme vodič tvaru smyčky, který je otáčivý kolem své osy. Prochází-li smyčkou elektrický proud, působí na části smyčky kolmé k indukčním čarám magnetické síly opačného směru, které uvádějí smyčku do otáčivého pohybu. Moment této dvojice sil se během otáčení mění podle toho, jak se mění velikost magnetických sil.

2.5. Pravidlo pravé ruky (Ampérovo pravidlo)

„Jestliže palec pravé ruky ukazuje směr elektrického proudu ve vodiči, pak pokrčené prsty ukazují orientaci magnetických indukčních čar.“



Obrázek 2.5-1: Pravidlo pravé ruky

Ampérovo pravidlo pravé ruky popisuje orientaci magnetických indukčních čar při průchodu elektrického proudu přímým vodičem, popřípadě cívkou.

Z tohoto pravidla lze snadno odvodit Ampérovo pravidlo pravé ruky pro cívku, které zní následovně: „Cívku uchopíme do pravé ruky tak, že ohnuté prsty ukazují směr elektrického proudu v jejích závitech. Odtážený palec pak ukazuje severní pól cívky.“

2.6. Magnetické pole působící na proudovou smyčku

Ampérův zákon pravé ruky vychází z těchto předpokladů. Vložíme-li cívku, kterou protéká proud I do magnetického pole, začne na cívku působit indukce B momentem M .

$$M = \mu \times B \quad (2.3.4-1)$$

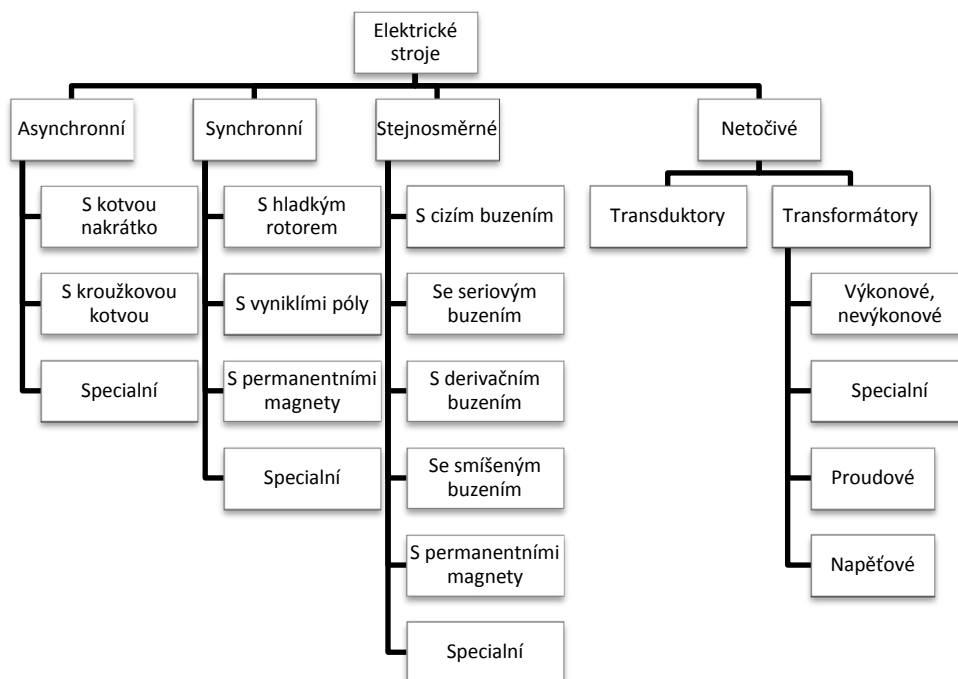
kde μ je magnetický dipólový moment cívky, jeho směr je dán pravidlem pravé ruky a velikost je $\mu = NIS$, kde N je počet závitů cívky a S obsah plochy jednoho závitu a I je proud protékající cívkou.

3. ELEKTRICKÉ STROJE

Zaujímají přední místo v elektrotechnických zařízeních. Využívají elektromagnetické indukce na přeměnu parametrů elektrické energie u transformátorů a silového působení magnetického pole na proudovou smyčku u točivých strojů při přeměně elektrické energie na mechanickou a naopak.

3.1. Rozdělení elektrických strojů

Dělí se na točivé stroje, kam patří motory a generátory a netočivé, do nichž patří transformátory. Točivé stroje slouží ke změně elektrické energie na mechanickou, tyto stroje nazýváme motory. V opačném případě, kdy je mechanická energie přeměněna na elektrickou, mluvíme o generátorech. Netočivé stroje (transformátory) slouží pro změnu parametrů elektrické energie.

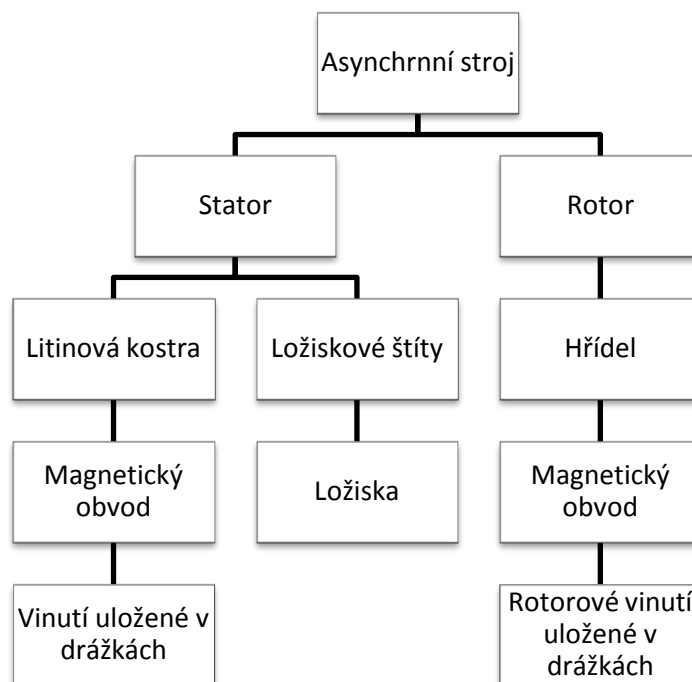


Obrázek 3.1-1: Diagram rozdělení elektrických strojů

3.2. Asynchronní stroje

Využívají se nejčastěji jako motory. Asynchronní motory (dále AM) jsou nejrozšířenější elektromotory, protože jsou jednoduché, laciné a vyžadují malou údržbu. Díky své jednoduchosti patří i mezi provozně nejspolehlivější točivé stroje. V praxi se používají jako pohony čerpadel, ventilátorů, pásových dopravníků, výtahů, tramvají atd.

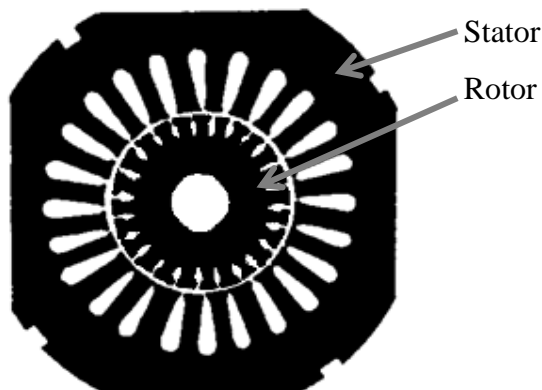
3.2.1. Konstrukce asynchronního stroje



Obrázek 3.2-1: Diagram konstrukce asynchronního stroje

Stator se skládá z litinové kostry a dvou ložiskových štítů. Do kostry statoru jsou zalisovány navzájem izolované plechy s drážkami, které tvoří magnetický obvod stroje. Do těchto drážek se ukládá vinutí.

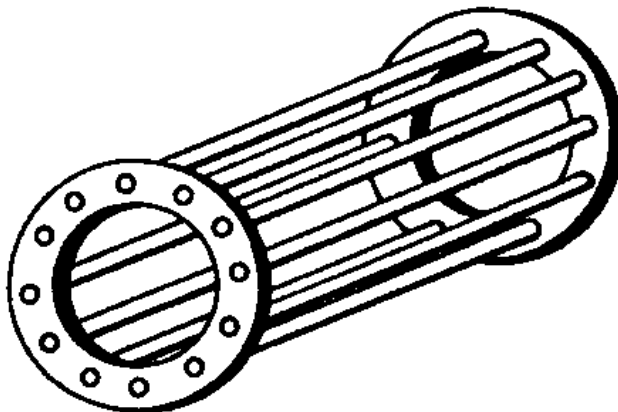
Na hřídeli rotoru jsou nalisovány rotorové plechy s drážkami, které tvoří druhou část magnetického obvodu. Rotor se otáčí v ložiskách, které jsou upevněny v ložiskových štítech statoru.



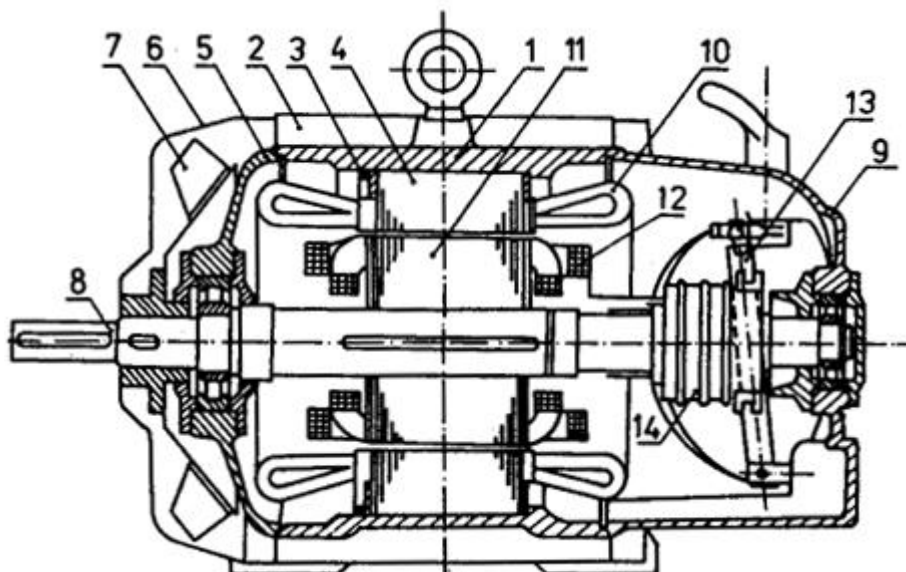
Obrázek 3.2-2: Tvar statorového a rotorového plechu

Mezi statorem a rotorem je vzduchová mezera 0.3 – 1 mm.

Rotorové vinutí je realizováno dvojím způsobem. Je-li vinutí v drážkách rotoru uspořádáno stejně jako ve statoru, jsou vývody tohoto vinutí vyvedeny ke kroužkům, jedná se o motor kroužkový s vinutou kotvou. Naopak jsou-li v drážkách rotoru umístěny tyče z hliníku či mědi a na obou čelních stranách jsou spojeny spojovacími kruhy nakrátko, mluvíme o motoru s kotvou nakrátko.



Obrázek 3.2-3: Rotorová klec motoru nakrátko



Obrázek 3.2-4: Řez uzavřeným asynchronním kroužkovým motorem

Popis: 1 kostra, 2 žebra kostry, 3 zajišťovací péra statoru, 4 statorové plechy, 5 zadní ložiskový štít, 6 kryt větráku, 7 větrák, 8 hřídel, 9 přední ložiskový štít, 10 statorové vinutí, 11 rotorové plechy, 12 rotorové vinutí, 13 spojovač kroužků, 14 sběrací kroužky.

3.2.2. Princip asynchronního stroje

Trojfázovým vinutím statoru, připojeným na trojfázovou síť, protéká trojfázový proud. Tento proud vyvolá ve vzduchové mezeře stroje točivé magnetické pole, které se otáčí synchronními otáčkami n_s . Siločáry magnetického pole protínají vodiče statorového i rotorového vinutí a indukují v nich napětí.



Napětí indukované ve statorovém vinutí působí proti napětí sítě, čímž omezuje statorový proud na hodnotu, pro kterou je stroj navržený. Napětí indukované v rotorovém vinutí v něm vyvolá proud. Na rotorové vinutí, jež se nachází v magnetickém poli a protéká jím proud, působí mechanická síla, stejně jako na každý proudový vodič v magnetickém poli. Na základě Lenzova zákona se vodiče rotoru začnou vychylovat ve směru otáčení magnetického pole, protože se svými účinky (tj. snížením rychlosti pohybu vodičů vůči poli) snaží potlačit příčinu, pro kterou se v nich indukuje napětí a následně protéká proud.

Při postupném narůstání otáček se snižuje relativní pohyb vodičů rotoru vůči točivému poli a zpomaluje se i časová změna magnetického toku vázaného těmito vodiči. Tím se snižuje indukované napětí, proud i mechanická síla na vodiče. Tak dochází k ustálení otáček rotoru na určité hodnotě pod synchronními otáčkami magnetického pole. Synchronní otáčky nemůže rotor nikdy dosáhnout, protože by při nich nebyl žádný relativní pohyb vodičů rotoru vůči točivému poli, neindukovalo by se napětí, a tudíž by netekl žádný proud a nevznikl by žádný točivý moment. Z tohoto důvodu se tento motor nazývá asynchronní resp. indukční, protože jeho působení je založeno na indukování napětí v rotoru.

Asynchronní stroje mohou také pracovat jako asynchronní generátory v případě, že poháněním stroje dosáhneme jeho mechanických otáček vyšších, než jsou otáčky synchronní. Tak jsou indukovaná napětí a proudy v rotoru opačného smyslu a stroj tedy dodává činný elektrický výkon do sítě.

Poháníme-li stroj mechanickým momentem působícím proti otáčení točivého magnetického pole, pracuje jako synchronní brzda, tj. moment asynchronního stroje působí proti hnacímu mechanickému momentu.

V praxi se uvádějí otáčky AM v otáčkách za minutu. Synchronní otáčky jsou dány vztahem

$$n_s = \frac{(60 \cdot f_1)}{p} \quad (3.2.2-1)$$

kde p značí počet pólových dvojic a f_1 frekvenci napětí a proudu ve statoru.

Rozdíl mezi otáčkami rotoru n a synchronními otáčkami n_s udává skluz s vztažený k jedné otáčce

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}. \quad (3.2.2-2)$$

Otáčky rotoru n jsou potom dány vztahem

$$n = n_s \cdot (1 - s). \quad (3.2.2-3)$$

Proudy indukované ve vinutí rotoru vytváří točivé magnetické pole rotoru, které se otáčí vzhledem k rotoru stroje. Rychlost otáček točivého magnetického pole rotoru n_2 se vypočítá ze vztahu

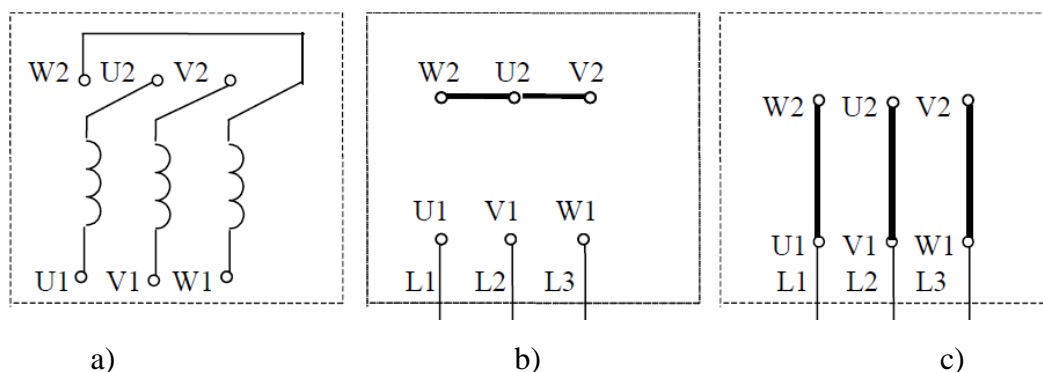
$$n_2 = n_s - n = \frac{f_2}{p} \quad (3.2.2-4)$$

kde f_2 značí frekvenci napětí a proudu ve vinutí rotoru

$$f_2 = n_2 \cdot p = (n_s - n) \cdot \frac{f_1}{n_s} = s \cdot f_1 \quad (3.2.2-5)$$

3.2.3. Zapojení trojfázového statorového vinutí

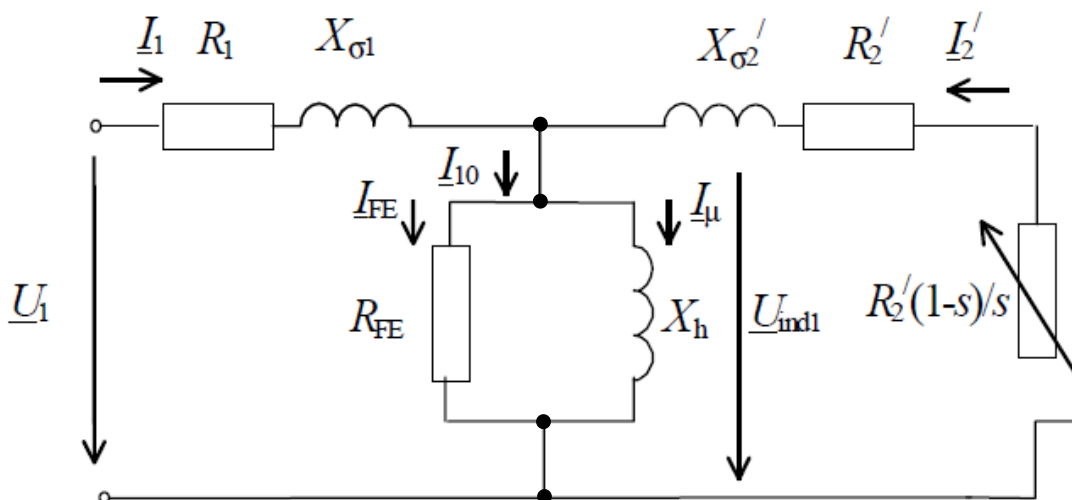
Vinutí statoru třífázového asynchronního stroje bývá vyvedeno na svorkovnici (viz obrázek 3.3.3–1a). Začátky vinutí jsou značeny písmeny U1, V1, W1 a konce U2, V2, W2. Tato vinutí můžeme pomocí vodivých spojek zapojit do trojúhelníka (viz. obrázek 3.3.3–1c), nebo do hvězdy (viz obrázek 3.3.3–1b).



Obrázek 3.2-5: Zapojení svorkovnice asynchronního motoru

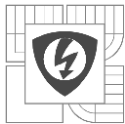
3.2.4. Náhradní schéma asynchronního motoru

Náhradní schéma AM je analogické s náhradním schématem transformátoru, v rovnicích pro indukovaná napětí je navíc tzv. činitel vinutí, který vyjadřuje prostorové rozložení vinutí každé fáze, které jsou tvořeny více cívkami rozloženými po obvodu statoru, tak aby prostorový průběh magnetické indukce byl co nejbližší sinusovce a aby se omezil vliv vyšších harmonických. Dále na výstupních svorkách je připojena činná zátěž, jejíž velikost závisí na skluzu.



Obrázek 3.2-6: Náhradní schéma asynchronního motoru

Efektivní indukovaná napětí v jedné fázi vinutí statoru a rotoru udává vztah



$$U_{ind1} = 4,44 \cdot k_{v1} \cdot f_1 \cdot N_1 \cdot \phi_m \quad (3.2.4-1)$$

kde k_{v1} je činitel vinutí statoru, N_1 počet závitů jedné fáze statoru, ϕ_m celkový magnetický tok ve vzduchové mezeře.

$$U_{ind2} = 4,44 \cdot k_{v2} \cdot f_2 \cdot N_2 \cdot \phi_m = 4,44 \cdot k_{v2} \cdot f_1 \cdot s \cdot N_2 \cdot \phi_m = U_{ind1} \cdot s \quad (3.2.4-2)$$

kde k_{v2} je činitel vinutí rotoru, U_{ind2} indukované napětí při zabrzděném rotoru ($s = 1$; $n = 0$), N_2 počet závitů jedné fáze rotoru.

Převod mezi statorem a rotorem

$$K = \frac{U_{ind1}}{U_{ind2}} = \frac{k_{v1} \cdot N_1}{k_{v2} \cdot N_2} \quad (3.2.4-3)$$

Přepočet rotorových veličin na stator se vypočítá pomocí vztahů

$$U_{ind2}' = K \cdot U_{ind2} = U_{ind1} \quad (3.2.4-4)$$

$$I_2' = I_2 \cdot \frac{m_2}{m_1} \cdot \frac{1}{K} \quad (3.2.4-5)$$

$$R_2' = R_2 \cdot K^2 \cdot \frac{m_1}{m_2} \quad (3.2.4-6)$$

$$X_{\sigma 2}' = X_{\sigma 2} \cdot K^2 \cdot \frac{m_1}{m_2} \quad (3.2.4-7)$$

kde m_1 je počet fází statoru a m_2 počet fází rotoru.

Velikost indukovaného napětí a velikost rozptylové reaktance v obvodu rotoru závisí na velikosti skluzu

$$X_{\sigma 2s} = 2\pi \cdot f_2 \cdot L_2 = 2\pi \cdot s \cdot f_1 \cdot L_2 = X_{\sigma 2} \cdot s \quad (3.2.4-8)$$

Přepočítaný proud tekoucí v rotoru na stator

$$I_2' = \frac{U_{ind2}' \cdot s}{R_2' + jX_{\sigma 2s}'} = \frac{U_{ind1}}{\frac{R_2'}{s} + jX_{\sigma 2}'} \quad (3.2.4-9)$$

kde $\frac{R_2'}{s} = R_2' \left(1 + \frac{1-s}{s}\right)$ co odpovídá náhradnímu schématu.

3.2.5. Asynchronní motor při chodu naprázdno

Při chodu naprázdno nedosáhne AM synchronních otáček. Moment motoru totiž není nulový, motor je zatížen na hřídeli momentem ztrát naprázdno. AM odebírá ze sítě proud naprázdno, který je vlivem vzduchové mezery mezi statorem a rotorem podstatně větší než u transformátoru. Proud rotoru naprázdno je velmi malý, protože skluz při chodu naprázdno se blíží k nule.

3.2.6. Asynchronní motor ve stavu nakrátko

Rotor AM je zabrzděn, motor se tedy neotáčí a stator je napájen ze sítě. Náhradní schéma je stejné jako u transformátoru nakrátko. Impedance nakrátko AM je však ve srovnání s transformátory větší, což je způsobeno větším rozptylem, který je ovlivněn jiným konstrukčním uspořádáním vinutí a vzduchovou mezerou. Proud nakrátko (v okamžiku rozběhu motoru tzv. záběrný proud) je tedy ve srovnání se zkratovým proudem transformátoru menší.

4. PROGRAMOVÉ VYBAVENÍ

V semestrální práci je využit program Ansoft MAXWELL 14.

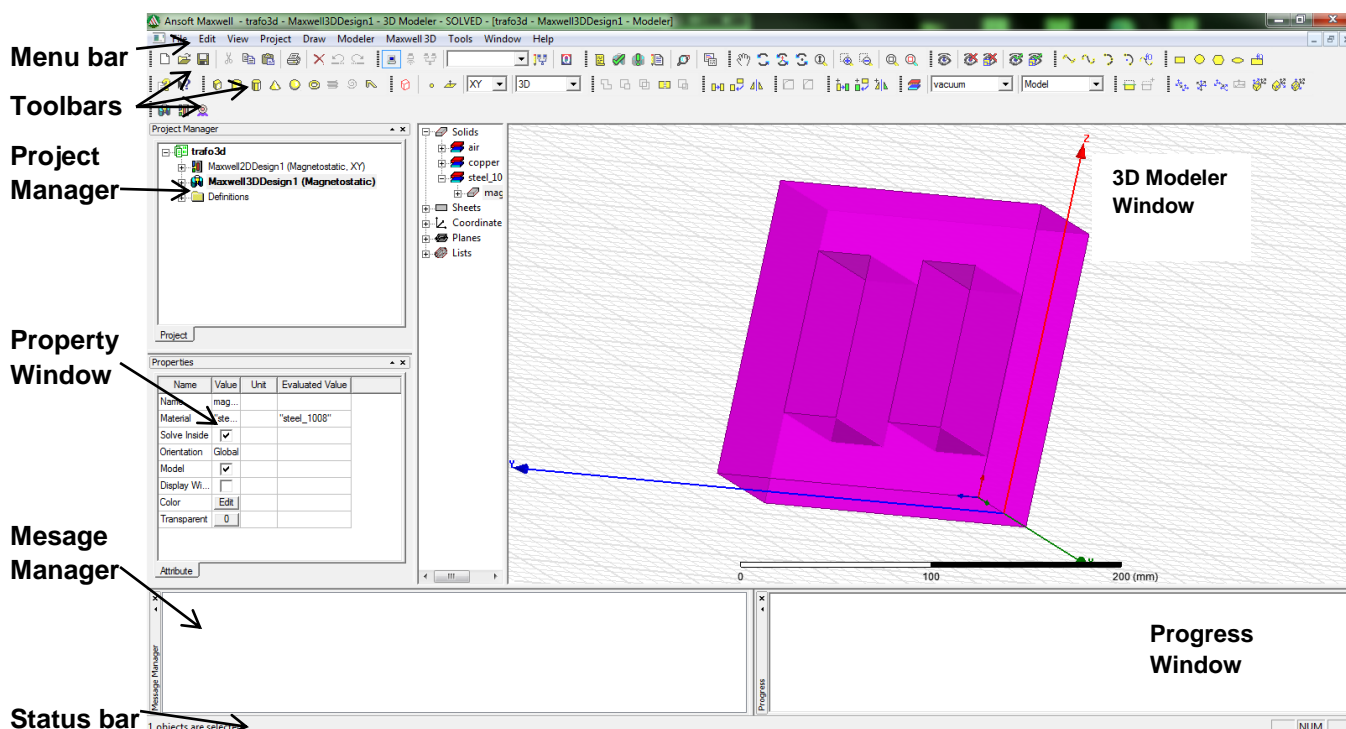
4.1. Ansoft MAXWELL 14

Maxwell je interaktivní software, který využívá numerickou metodu konečných prvků k řešení trojrozměrných a dvourozměrných elektrických a magnetostatických úloh, dále k řešení vířivých proudů a přechodových jevů.

4.1.1. Pracovní prostředí

Okno programu Maxwell má několik volitelných panelů:

- **Project Manager** - obsahuje strom návrhu, který znázorňuje strukturu návrhu řešené úlohy
- **Message Manager** - vypisuje důležité chyby nebo varování, ke kterým může dojít před začátkem simulace.
- **Property Window** - zobrazuje a zároveň umožňuje změnu parametrů vybraného objektu.
- **Progress Window** - ukazuje pokrok v řešení při výpočtech simulace modelu.
- **3D Modeler Window** - obsahuje vizualizaci modelu a strom modelu, který ukazuje strukturu vizualizace.
- **Status bar** - v češtině stavový řádek, znázorňuje souřadnice dalšího bodu při vytváření objektu a další informace o právě prováděných příkazech.



Obrázek 4.1-1: Pracovní prostředí Ansoft Maxwell 14



4.1.2. RMxprt Design

Plně integrovaný nástroj pro analytická řešení elektrických strojů. Obsahuje řadu šablon pro asynchronní, synchronní, stejnosměrné a komutační elektrické stroje, které umožňují snadno zadat navrhované parametry a vyhodnotit konstrukční požadavky již v raných fázích návrhu stroje. RMxprt poté může automaticky nastavit celý projekt v Maxwellu a to pro 2D nebo 3D řešení včetně geometrie, materiálů, okrajových podmínek apod.

5. VYTVOŘENÍ SIMULACE MAGNETICKÉHO OBVODU ASYNCHRONNÍHO MOTORU

5.1. Tabulka štítkových hodnot asynchronního motoru

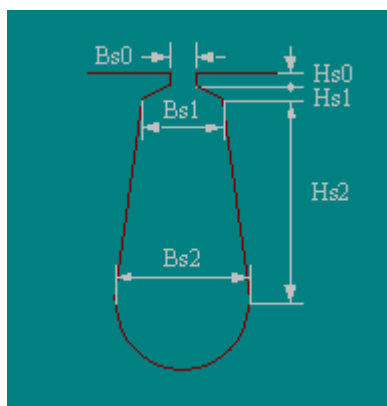
Tabulka 4.1.2-1: Parametry asynchronního stroje

Typ	1LA7133-4AA
Napětí	400V; D; 50Hz
Proud vinutím statoru	15,2A
Výkon asynchronního motoru	7,5kW
Účinnost	0,820
Otáčky	1455min ⁻¹
Počet pólů	2p=4
Počet drážek statoru	48
Počet drážek rotoru	36

5.2. Tvorba modelu

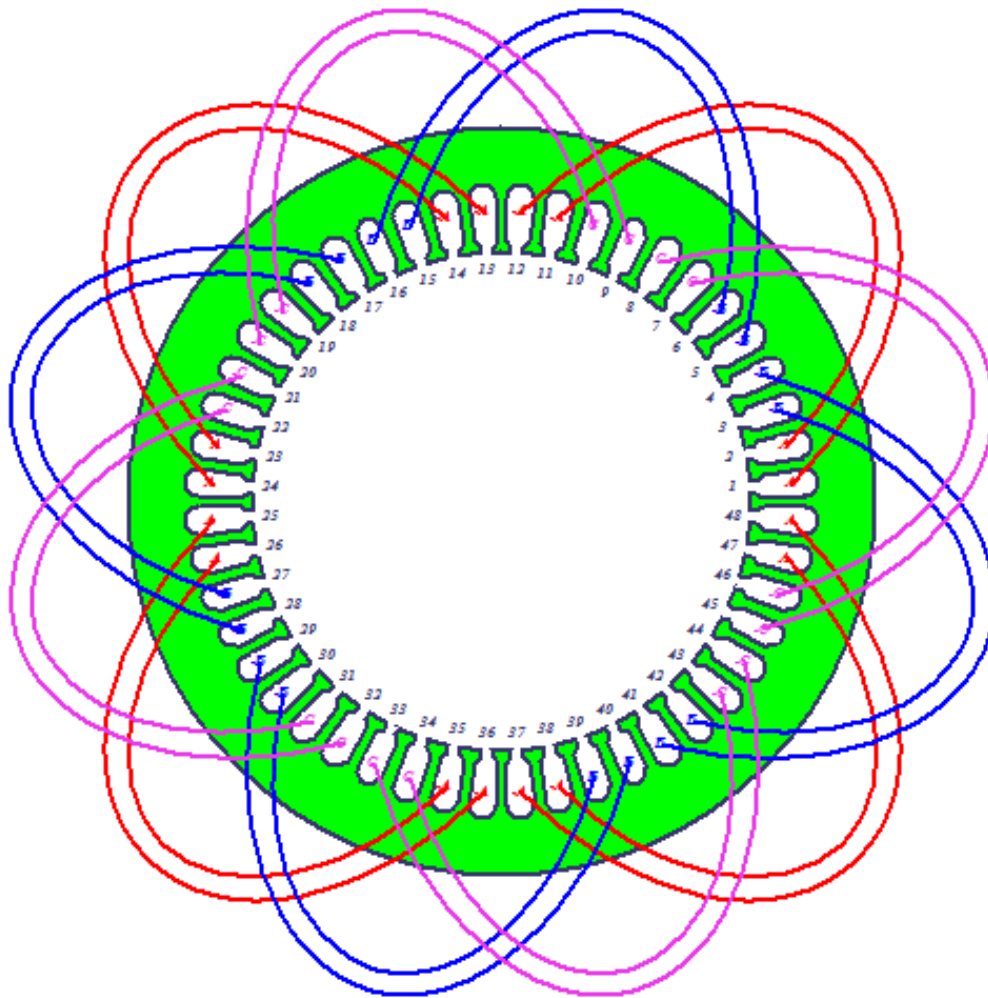
Model asynchronního stroje byl vytvořen pomocí RMxprt Design.

Postupovalo se od vytvoření geometrie statoru zadáním jeho délky 175mm, vnějšího 200mm, vnitřního průměru 122,728mm, počtu drážek 48 a zvolením správného druhu drážky pro statorové vinutí.



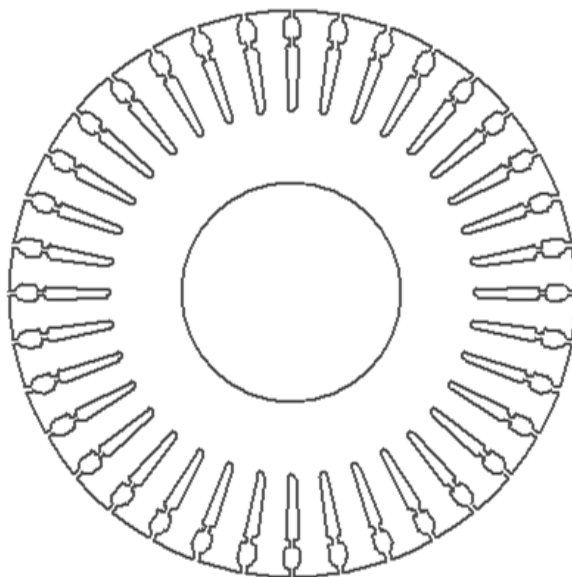
Obrázek 5.2-1: Okótovaný náčrt statorové drážky

Vinutí statoru se nastavuje podle zadaného schématu zapojení. Vinutí je jednovrstvé, červeně je vyznačeno vinutí pro svorku U, modře pro svorku V a fialově pro W. Směry vinutí jsou vyznačeny pomocí znaménka mínus, které znázorňuje směr do statoru.



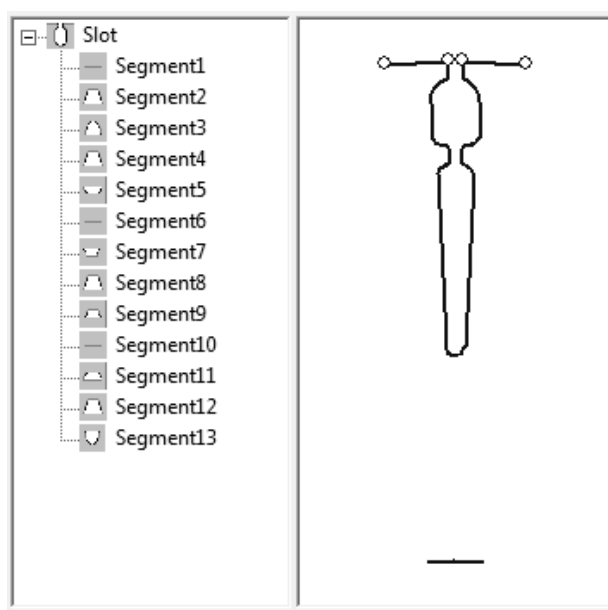
Obrázek 5.2-2: Zapojení statorového vinutí

Rotor má zadány následující parametry 36 drážek, vzduchová mezera je 0,364mm vnitřní průměr rotoru 48mm.



Obrázek 5.2-3: Návrh rotoru

Pomocí segmentů se ručně vytvořila drážka pro klec, jelikož se neshodovala se žádným tvarem v nabídce RMxpřtu.

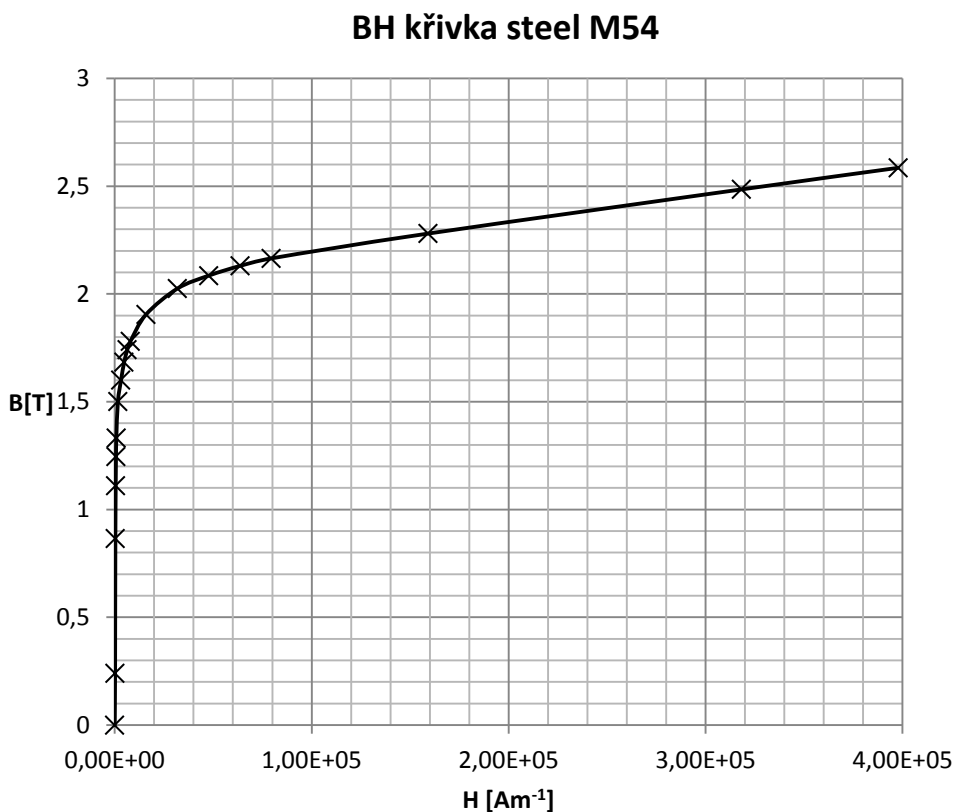


Obrázek 5.2-4: Drážka pro rotorovou klec

5.3. Definice materiálů

Jako materiál satorových a rotorových plechů je použit SteelM54 jehož magnetizační křivka je vidět na obrázku 5.3-1. Tento materiál není uveden v knihovně materiálů, proto musel být importován.

H	B
[Am ⁻¹]	[T]
0	0
317	0,86
476	1,12
635	1,23
794	1,32
1507	1,49
3175	1,61
4762	1,68
6349	1,73
7937	1,77
15873	1,89
31746	1,98
47619	2,02
63492	2,045
126984	2,135
253963	2,304
507936	2,634
793651	3



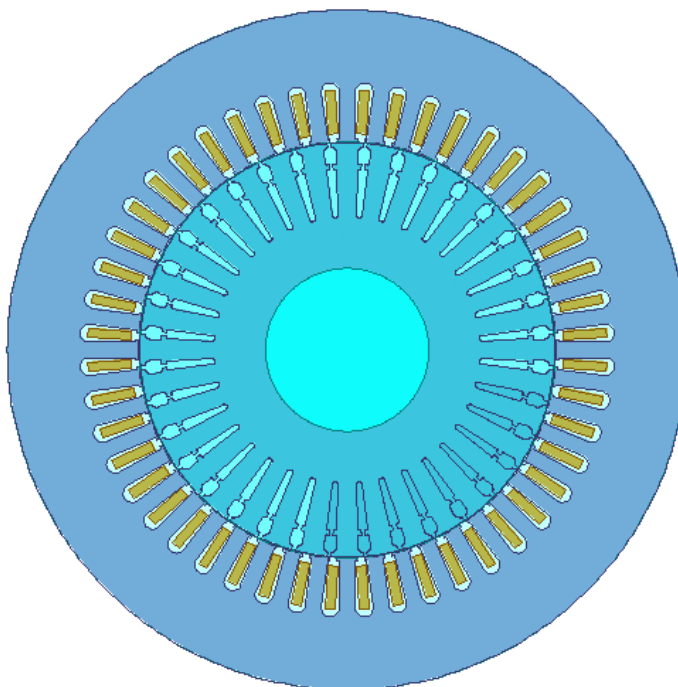
Obrázek 5.3-1: Prvotní magnetizační křivka steel M54

Tabulka 4.1.2-1: B-H

Také pro rotorové vinutí musel být importován materiál CAST_ALUMINIUM_83C.

V posledním kroku před spuštěním analýzy se nastaví parametry pro výpočet asynchronního stroje. Těmito parametry se myslí, že motor bude zatížen konstantní zátěží, jeho provozní teplota je 85°C a dále jeho napětí, otáčky, zapojení vinutí satoru a frekvence na satoru 50Hz.

5.4. Nastavení simulace modelu



Obrázek 5.4-1: Navrhnutý 2D model asynchronního stroje

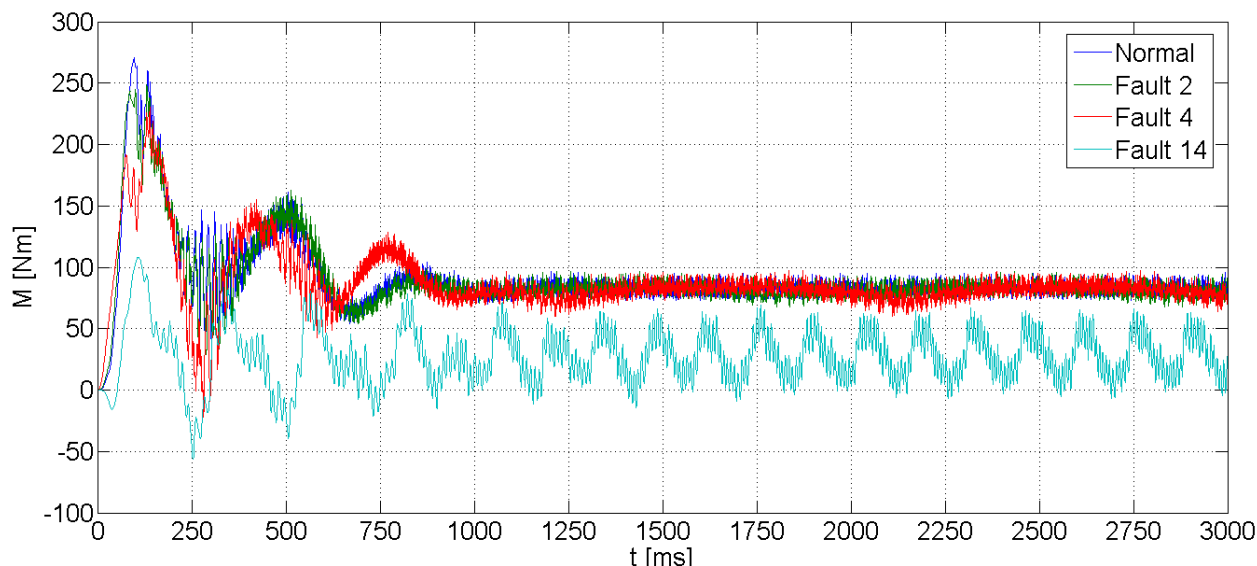
Po analytickém vyřešení AM se vygeneruje 2D model asynchronního motoru. V nastavení pro pohyb v modelu se nastavuje počáteční úhlová rychlost, moment setrvačnosti, tlumení a průběh zatěžovacího točivého momentu.

Pro analýzu průběhu magnetického pole asynchronního motoru je nutné nastavit počáteční čas, konečný čas a délku kroku. Čas analýzy byl zvolen od 0s po 0,3s po 1ms. Výsledky rozložení polí jsou ukládány také po 1ms, pro pozdější zpracování.

6. ANALÝZA ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ

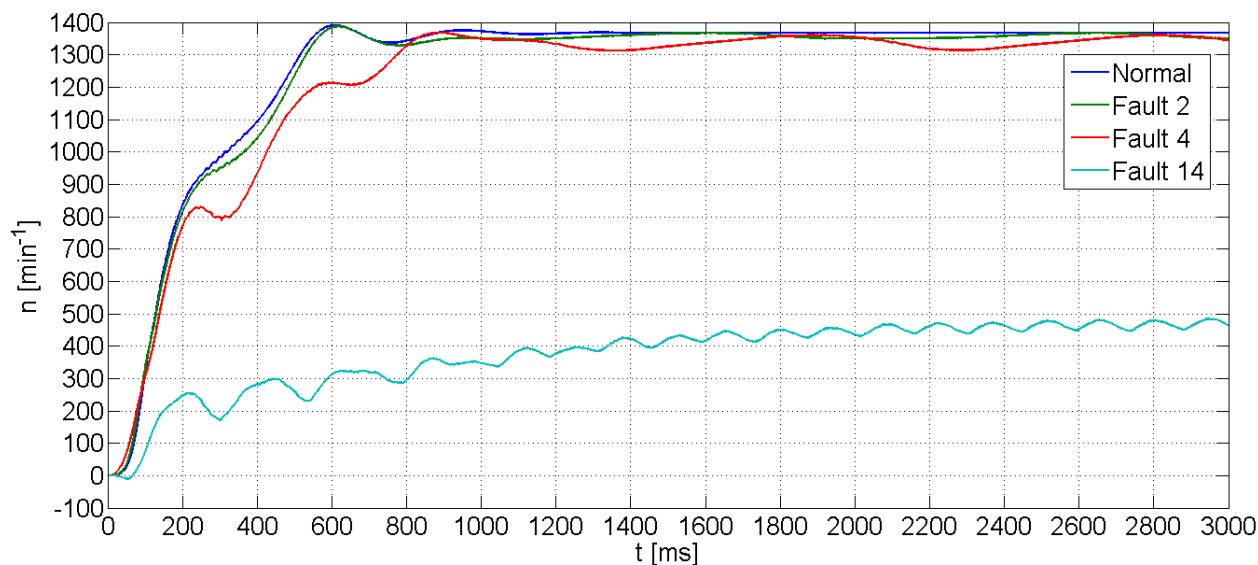
Výsledkem simulace asynchronního motoru jsou grafy momentů, rychlosti otáčení rotoru, proud vinutím na statoru, rozložení magnetické indukce a rozložení siločar.

6.1. Grafy



Graf 6.1-1: Moment asynchronního motoru pro normální a poruchové stavy

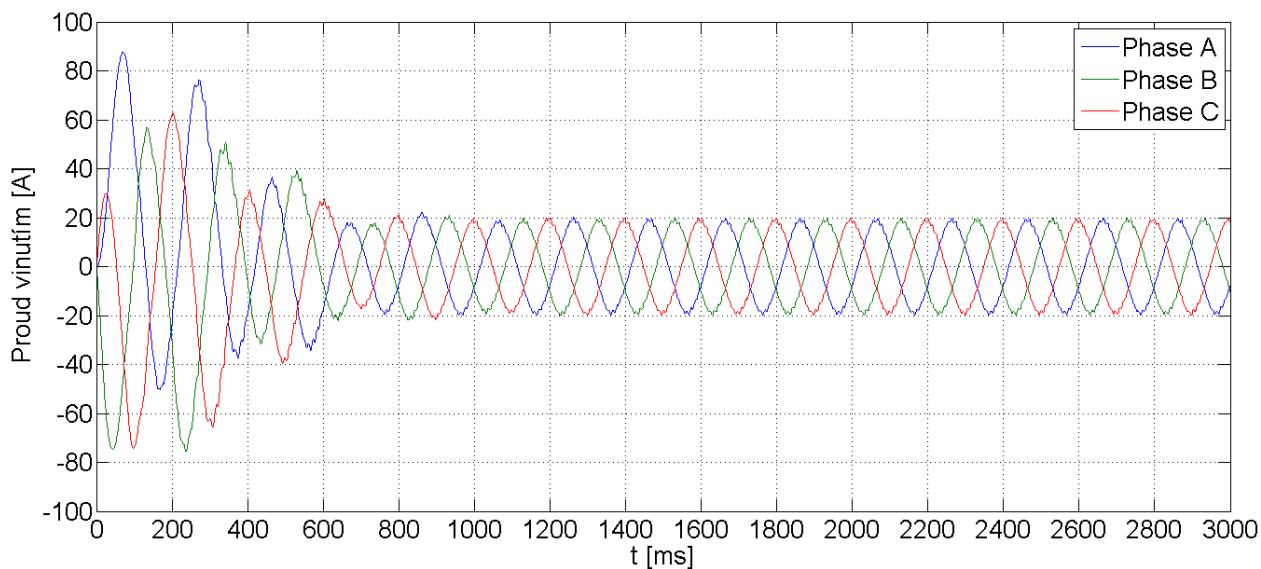
Na grafu 6.1-1 je zobrazeno porovnání momentů při různých stavech. Za normálního provozu dosahoval moment motoru po ustálení hodnoty 90 Nm. Porovnáme-li normální provoz se simulovanými poruchami, zjistíme, že na moment nemá porušení dvou tyčí žádný vliv, v případě čtyř tyčí začne moment pravidelně pulzovat mezi 90 Nm a 70 Nm. Poruší-li se ovšem čtrnáct tyčí moment se v podstatě vůbec neustálí a pulzuje pravidelně mezi 65 Nm a 0 Nm.



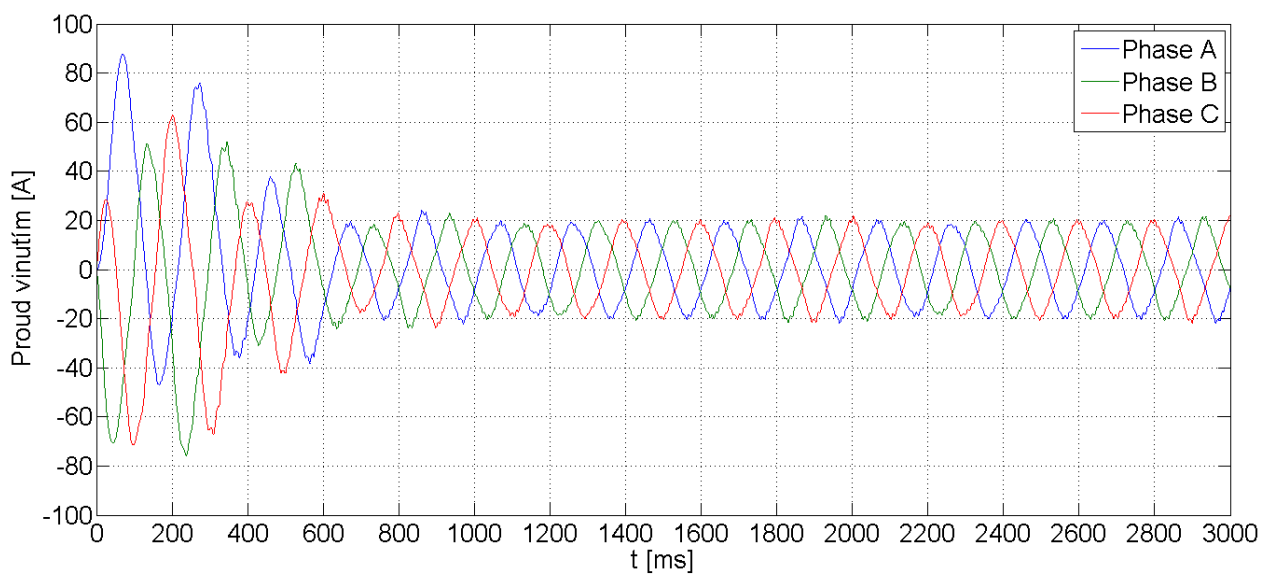
Graf 6.1-2: Rychlost otáčení rotoru pro normální a poruchové stavy

Graf 6.1-2 znázorňuje průběh otáček za minutu v čase, kde za normálního provozu dosahují otáčky motoru po ustálení 1367 min⁻¹. Hodnota otáček je menší než udávaná v parametrech (Tabulka 4.1.1-1), ale pohybuje se v toleranci 10%. V případě poruchy dvou tyčí

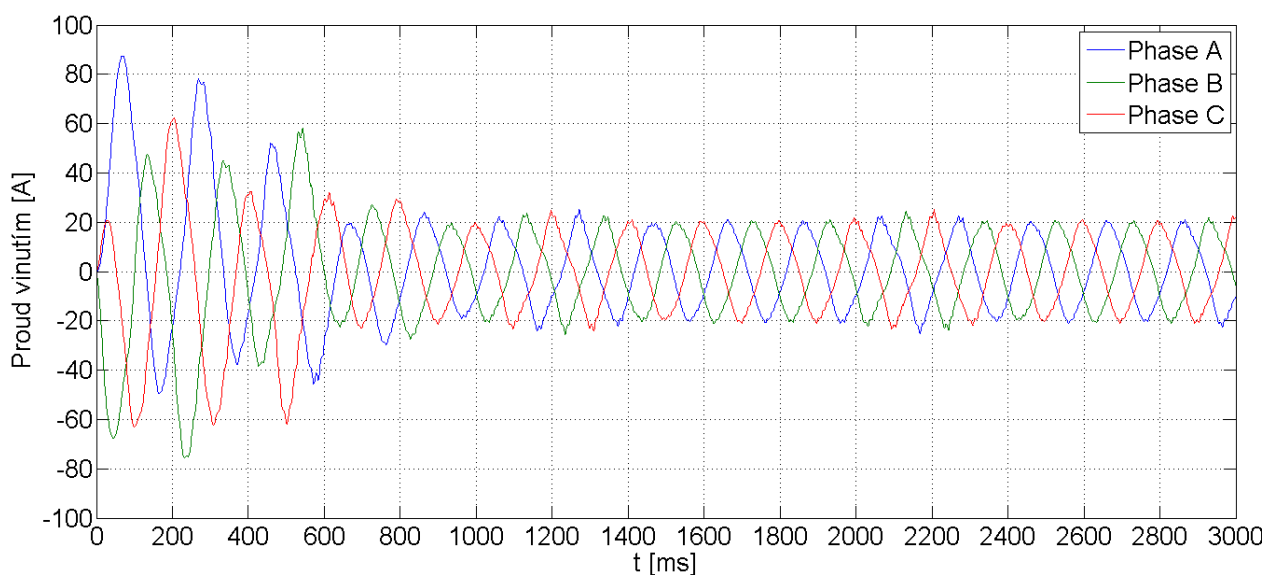
se průběh otáček mění a začíná se vlnit, kde maximum je právě 1367 min^{-1} a minimum 1351 min^{-1} . Při porušení čtyřech tyčí otáčky mírně poklesnou a ještě více kolísají. Nakonec porucha 14 tyčí způsobí pokles otáček na jednu třetinu na cca 470 min^{-1} a ještě větší kolísání.



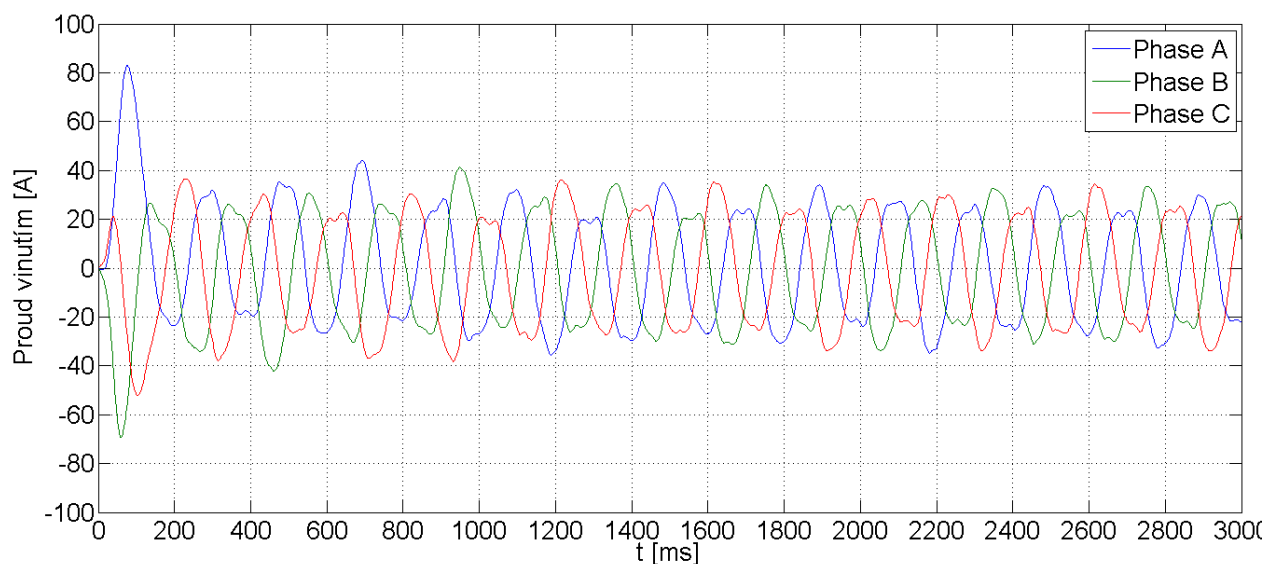
Graf 6.1-3: Proud vinutím – normal



Graf 6.1-4: Proud vinutím – Fault 2



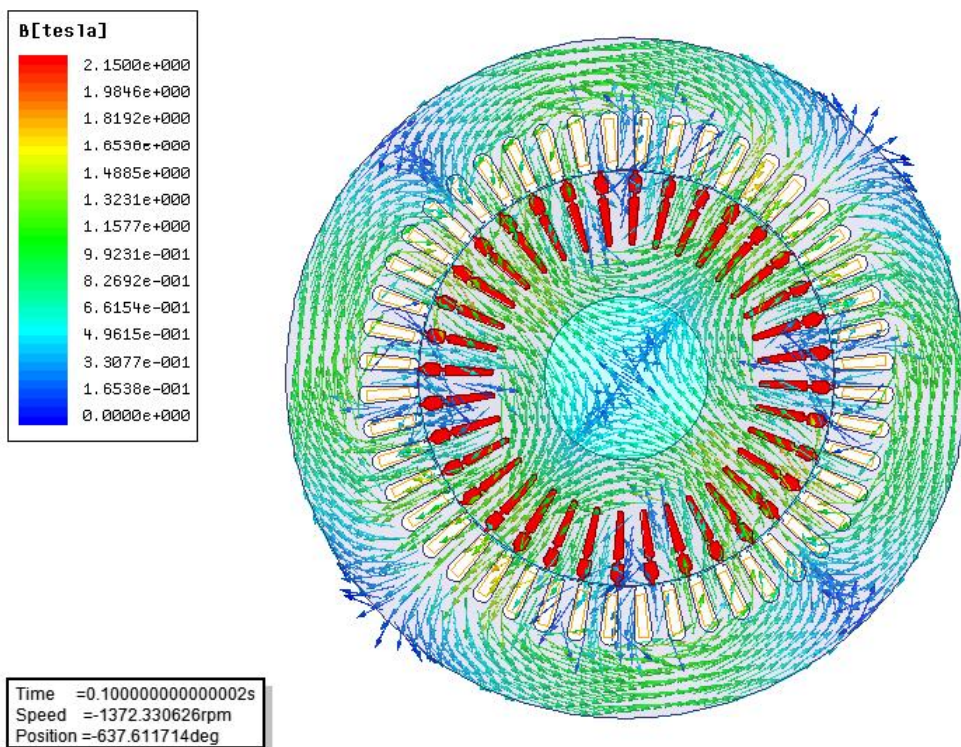
Graf 6.1-5: Proud vinutím – Fault 4



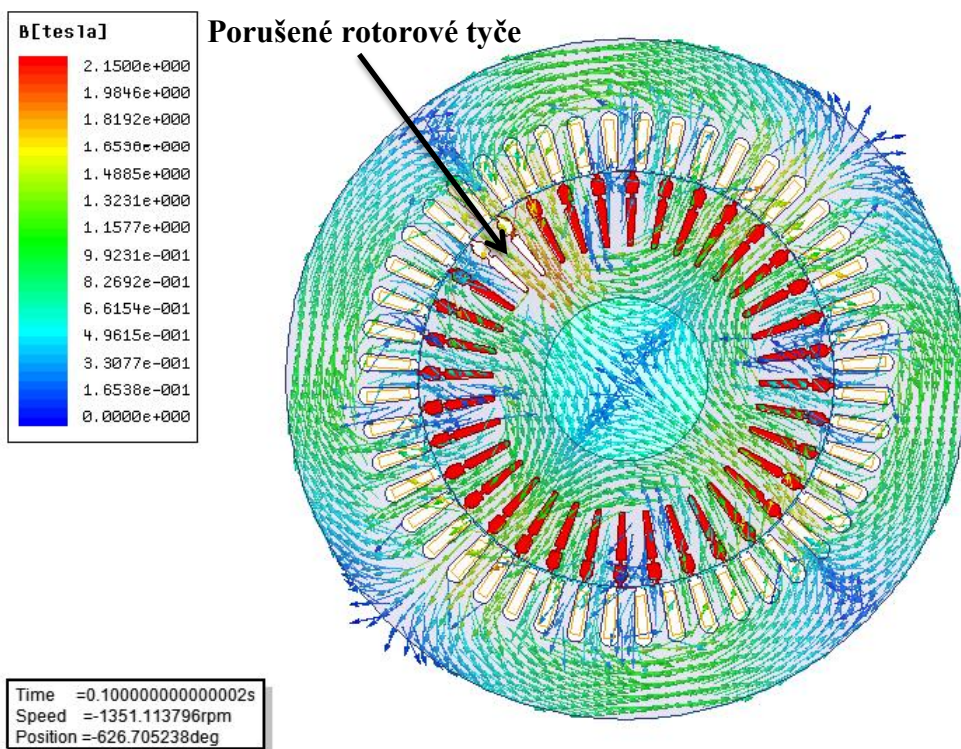
Graf 6.1-6: Proud vinutím - Fault 14

Grafy 6.1-3 až 6 znázorňují proudy statorovým vinutím. Proud všech fází za normálního provozního stavu dosahuje po ustálení 20 A. Při poruše dvou tyčí vidíme, jak průběh maxim všech fází začíná velmi mírně kolísat. Následkem poruchy čtyř tyčí se toto kolísání ještě více projeví a po odpojení čtrnácti tyčí je průběh fází již zcela zničený a maxima proudů dosahují až 40 A.

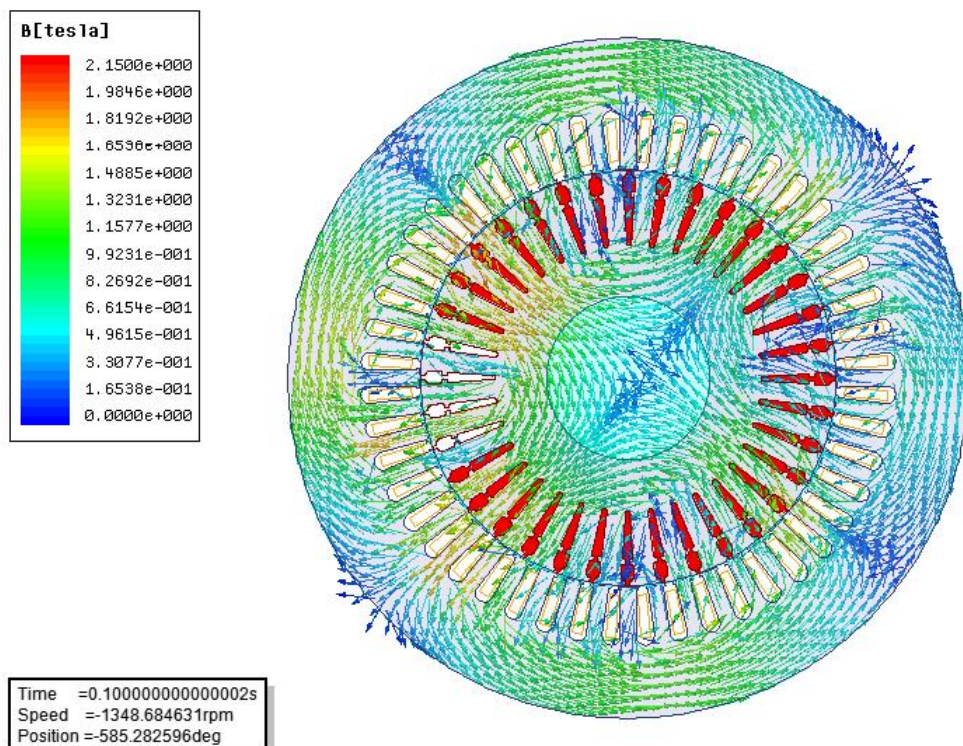
6.2. Vektorové rozložení magnetické indukce



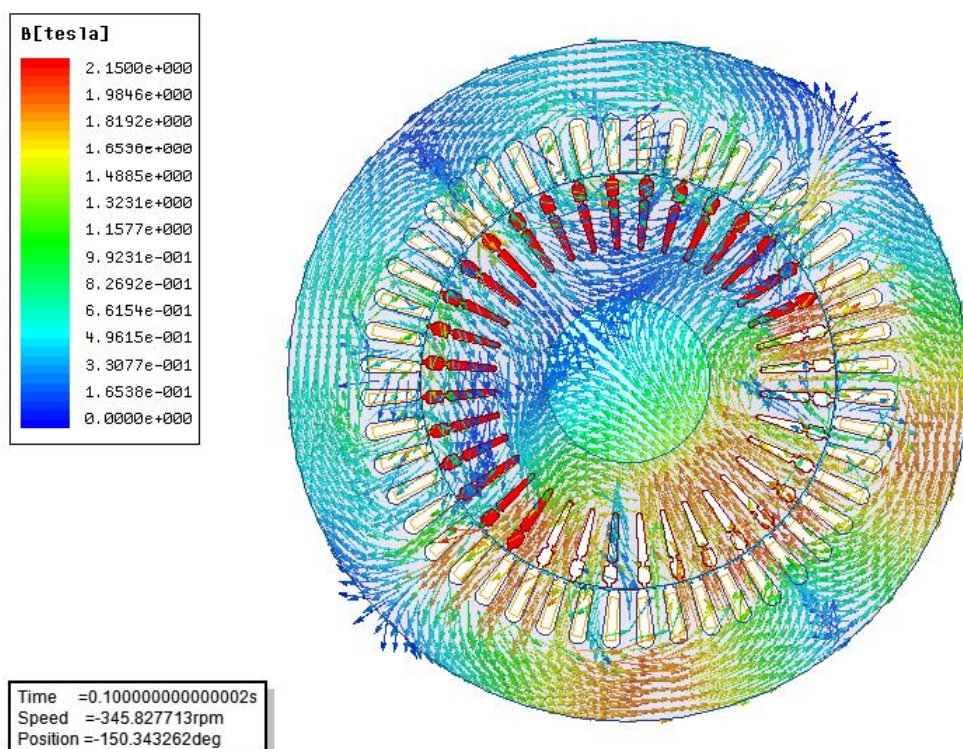
Obrázek 6.2-1: Vektorové rozložení magnetické indukce - normální



Obrázek 6.2-2: Vektorové rozložení magnetické indukce - Fault 2



Obrázek 6.2-3: Vektorové rozložení magnetické indukce - Fault 4

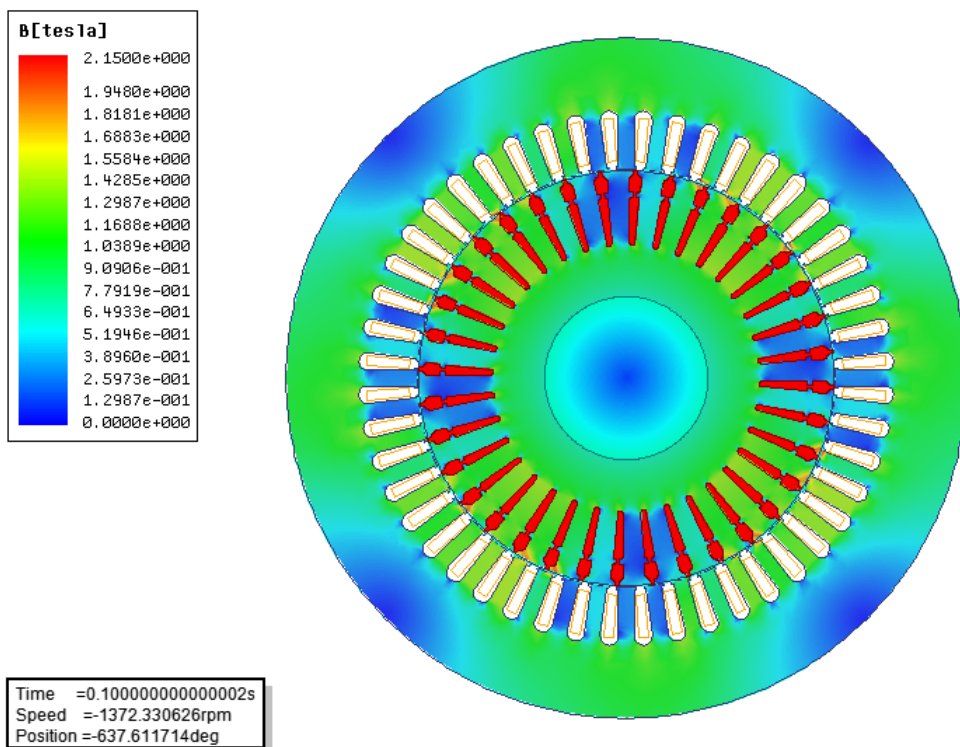


Obrázek 6.2-4: Vektorové rozložení magnetické indukce - Fault 14

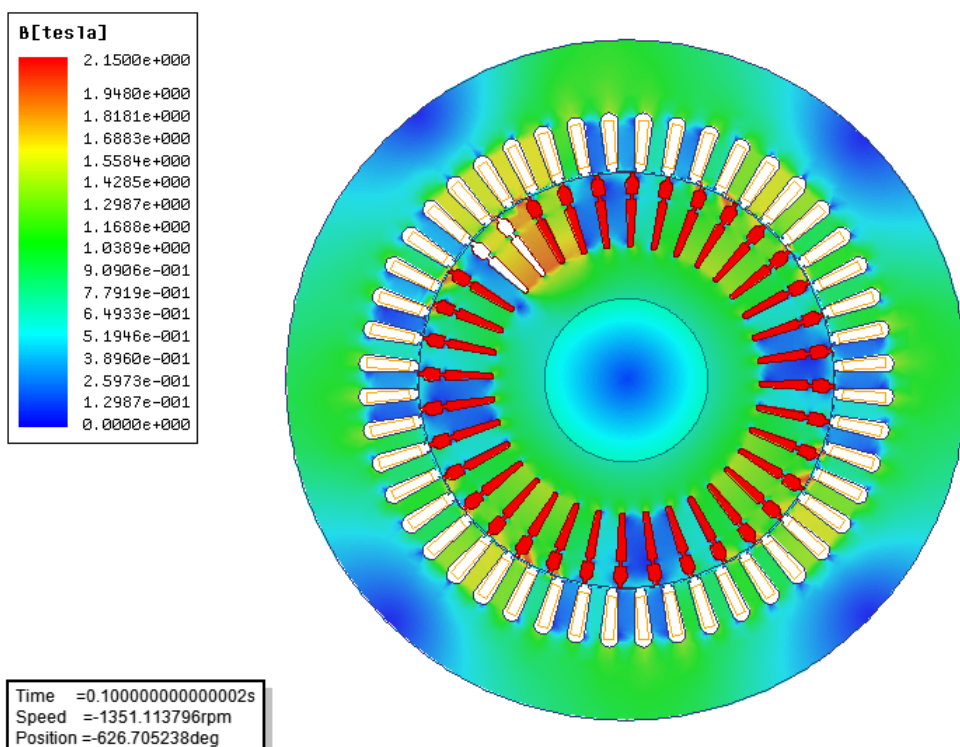
Na obrázku 6.2-1 je vektorové rozložení magnetické indukce za normálního provozu. Porovnáním s obrázky 6.2-2 až 6.2-4 se zjistí změny ve vektorovém rozložení pro případ poruchy. Porušené rotorové tyče nejsou vybarveny. Intenzita magnetické indukce se nám zvýší v okolí poruchy a snaží se využít okolní tyče. S porušením čtyř a více tyčí se mění celkové

vektorové rozložení magnetické indukce, kde jsou v případě poruchy čtrnácti tyčí následky nejvíce znatelné a vektorové rozložení v ose hřídele již není vyrovnané.

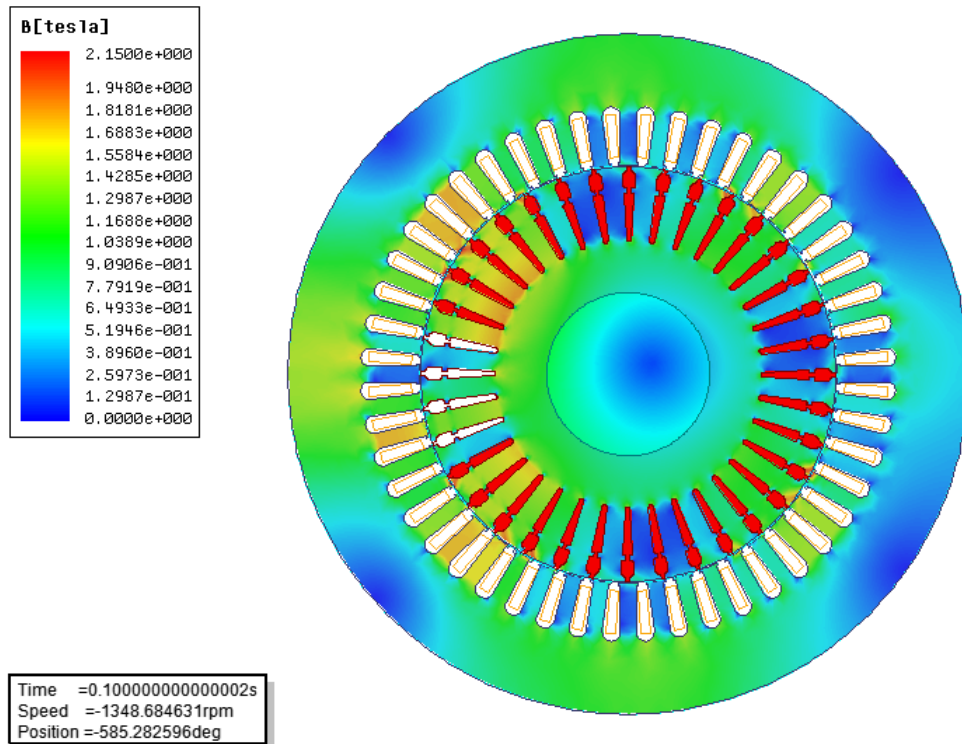
6.3. Rozložení magnetické indukce



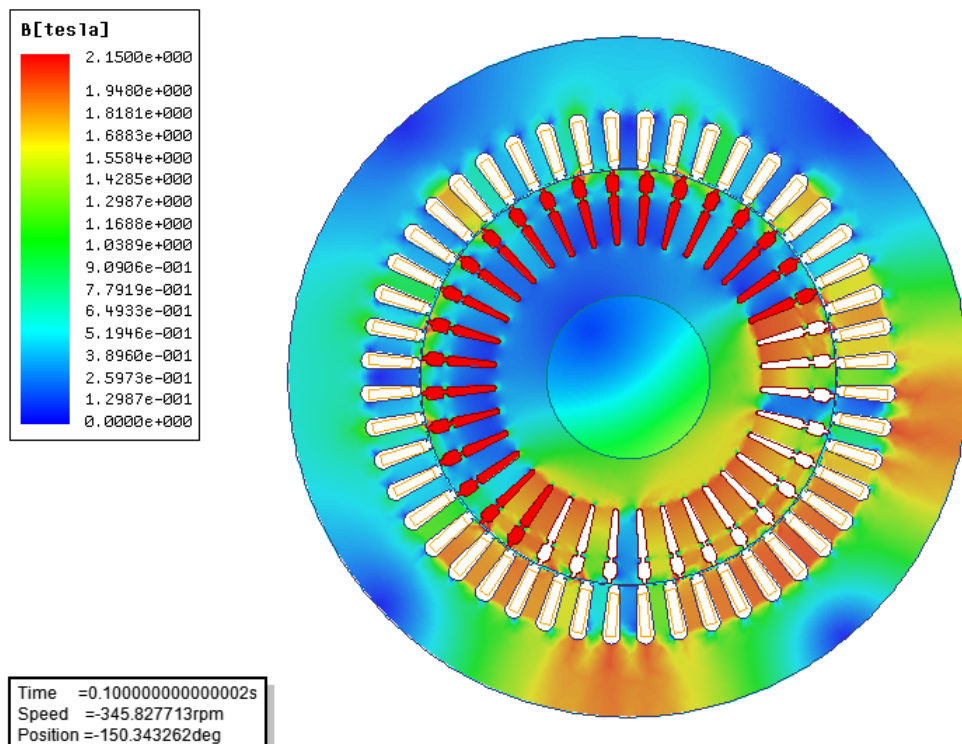
Obrázek 6.3-1: Rozložení magnetické indukce – normální



Obrázek 6.3-2: Rozložení magnetické indukce – Fault 2



Obrázek 6.3-3: Rozložení magnetické indukce – Fault 4

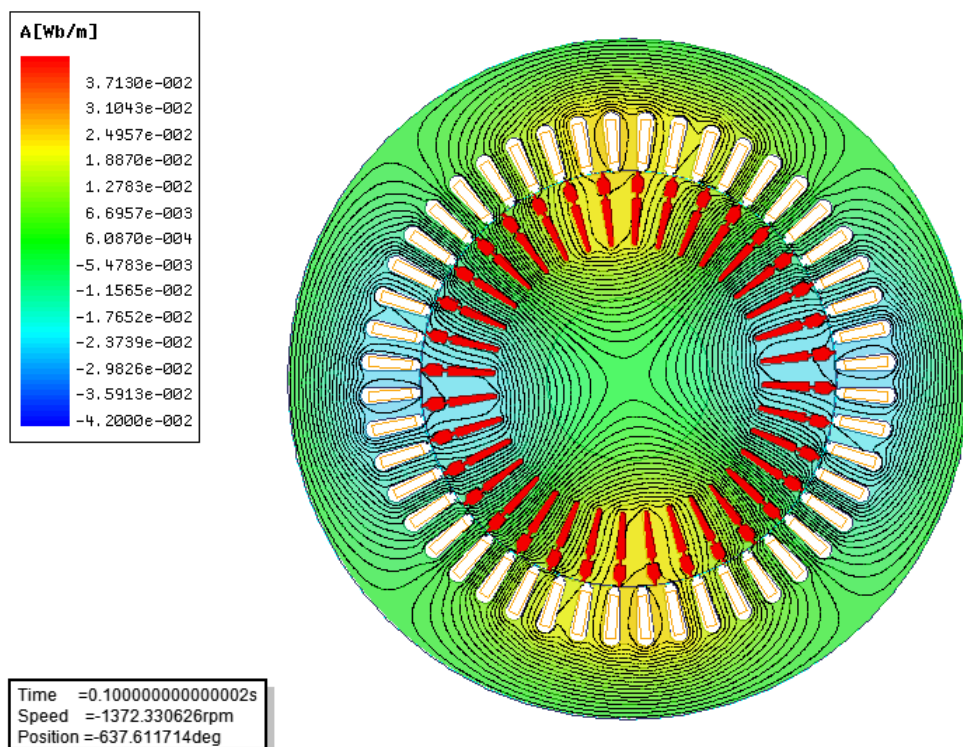


Obrázek 6.3-4: Rozložení magnetické indukce – Fault 14

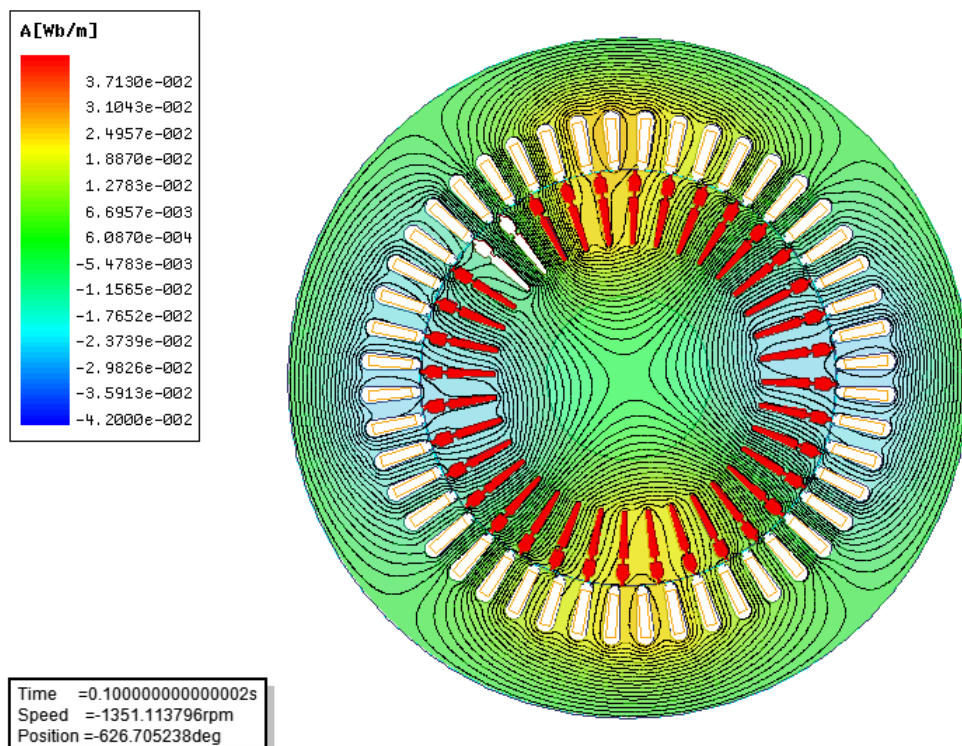
Obrázky 6.3-1 až 6.3-4 ukazují rozložení magnetické indukce. Na obrázku 6.3-1 vidíme, že AM je čtyřpólový a nedochází zde k žádnému přesycení magnetického obvodu. Na druhém

obrázku 6.3-2 dochází zde k přesycení magnetického obvodu v okolí poruchy dvou rotorových tyčí. Na třetím obrázku 6.3-3 intenzita magnetické indukce zvýší v okolních tyčích a vidíme zde i počátek vyosení středu. Na posledním obrázku vidíme totální přesycení v místě poruchy, co v tomto případě znamená polovinu magnetického obvodu AM. V místě poruchy neprotéká proud, jelikož tyče jsou odpojeny a proud se tak rozděluje do okolních tyčí, které se tak vlivem velkých proudů zahřívají. Tím se poruší symetrie magnetického pole a dojde k přesycení magnetického obvodu.

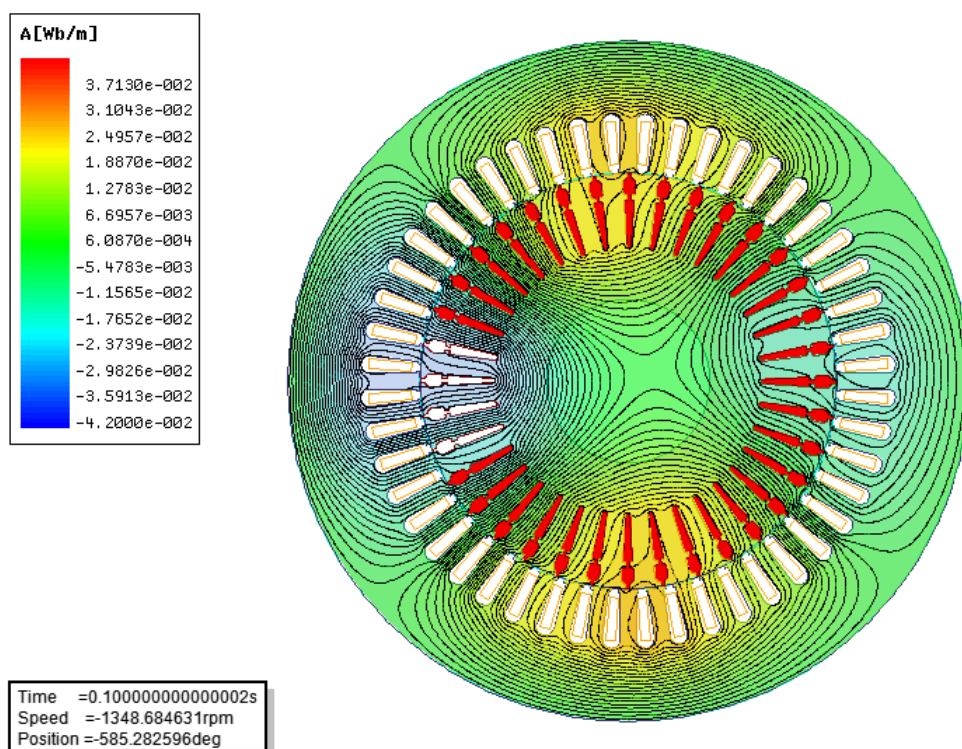
6.4. Rozložení siločar



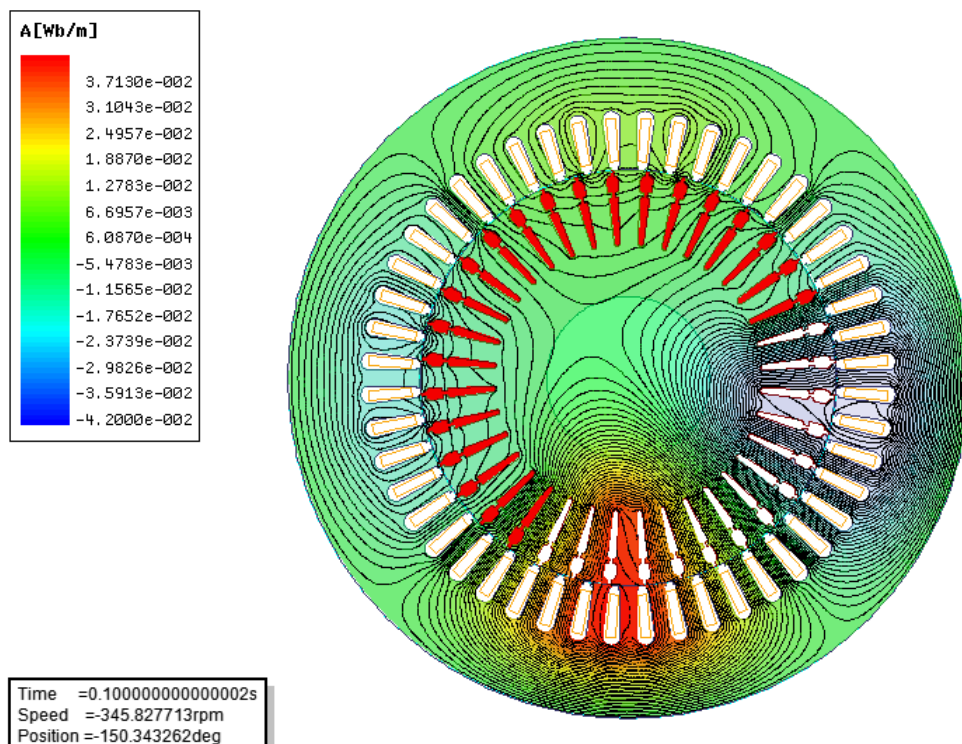
Obrázek 6.4-1: Rozložení siločar - normální



Obrázek 6.4-2: Rozložení siločar - Fault 2



Obrázek 6.4-3: Rozložení siločar - Fault 4



Obrázek 6.4-4: Rozložení siločar - Fault 14

Znázornění rozložení magnetických siločar vidíme na obrázcích 6.4-1 až 6.4-4. Při poruše dvou tyčí vidíme změnu v rozložení siločar v okolí porušených rotorových tyčí, které způsobí přesycení v okolí poruchy. Hustota siločar se s v okolí poruchy zvyšuje se zvyšujícím se počtem poškozených tyčí.

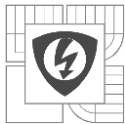
ZÁVĚR

Model čtyřpólového asynchronního stroje byl navržen v RMXprt Desingn, který tvorbu modelu značně zjednodušuje. Jedinou komplikací se stalo pouze zadání správného uspořádání statorového vinutí a vytvoření drážky pro rotorovou klec. V případě uspořádání vinutí je vhodné zadávat pořadí cívek ručně. Vytvořený model posloužil dále pro simulaci normálního provozu a poruchových stavů. Jako poruchový stav bylo zvoleno porušení tyčí na rotoru. Pro případ zkratování dvou, čtyř a čtrnácti tyčí. Výsledné grafy a vizualizace jsou zobrazeny v šesté kapitole.

Simulovaný asynchronní motor dosahuje za normálního provozu momentu 90Nm jak je vidět na grafu 6.1-1 následkem poruchy tyčí začínal moment nejdříve oscilovat a později s poruchou čtrnácti tyčí krouticí moment v podstatě ztrácí, protože průběh momentu začne prudce pulzovat. Tyto pulzy se shodují i s oscilací otáček za minutu. Průběh otáček je uveden v grafu 6.1-2. Otáčky motoru za normálního provozu dosahovali 1367min^{-1} . Při poruše dochází nejdříve stejně jako v průběhu momentů k vlnění otáček a následné porušením čtrnácti tyčí až k jejich poklesu na jednu třetinu jmenovitých otáček. V tomto poruchovém stavu je patrné již velké rozpětí v rychlosti otáček cca 50min^{-1} . Rozběh motoru je jak jde vidět z grafu také delší, k ustálení dochází až po 2,2 s na rozdíl od 1,2 s v případě normálního provozu.

Amplitudy proudů ve statorovém vinutí dosahují 20 A v normálním provozu (graf 6.1-3 až 6.1-6), co přibližně odpovídá efektivnímu proudu 15,2 A udávaného v parametrech motoru (Tabulka 4.1.1-1). Velikost při rozběhu motoru dosahuje až čtyřnásobku ustálené hodnoty a její průběh spolu s maximální hodnotou se nemění vlivem porušení rotorových tyčí. Vlivem porušení rotorových tyčí dochází k porušení ustáleného sinusového průběhu jednotlivých fází vinutí ve statoru, přičemž jejich průběh se stává čím dál více kolísavý. Pro poruchu čtrnácti tyčí dochází ve statorovém vinutí k pravidelným proudovým nárazům o dvojnásobku jmenovité hodnoty proudu statorovým vinutím. Následkem proudových nárazů může dojít k přetížení vinutí jeho zahřívání a poruše.

Z vizualizací asynchronního motoru lze poznat, že se jedná o motor čtyř pólový. Na obrázcích 6.2-1 až 6.2-4 je vektorové rozložení magnetické indukce. Napětí jednotlivých tyčí tvoří symetrickou fázorovou hvězdicí, která vyvolává v kleci proudy, jež tvoří symetrický vícefázový systém proudu. Při zvýšení odporu některé tyče nebo při přerušení tyče se poruší symetrie magnetického pole. To vyvolá deformaci magnetického pole ve vzduchové mezeře, a tím změny elektrických, elektromechanických, akustických a tepelných veličin. To je lépe znázorněno ve vizualizacích rozložení magnetické indukce (obrázky 6.3-1 až 6.3-4), nebo rozložení siločar (obrázky 6.4-1 až 6.4-4). Střed magnetického pole motoru je v případě poruchy rozdílný s osou hřídele. To má vliv na ložiska držící rotorovou hřídel, na které tak působí větší síly a dochází k jejich opotřebení. Následkem může být vyosení rotoru, jejímž důsledkem bude kontakt se statorem, následkem čehož dojde k mechanickému poškození motoru. V případě porušení velkého počtu tyčí se ale dříve motor vlivem velkého přesycení znázorněného například na obrázku 6.3-4 rychle přehřeje, nebo může dojít i k jeho destrukci. Poruchy rotorových tyčí mají tedy za následek zvýšení oteplení nepoškozené části vinutí, vznik parazitních momentů a zhoršení rozběhových podmínek.



LITERATURA

- [1] KARBAN, Pavel. *Zcu.cz* : <http://home.zcu.cz/~karban/> [online]. 2005 [cit. 2011-11-16]. Teaching. Dostupné z WWW: <http://home.zcu.cz/~karban/teaching/mmem/dolezel/course_1/LECT05.pdf>.
- [2] *Geologie.vsb.cz/svade/* [online]. 2004 [cit. 2011-11-16]. Svahové deformace - výukové multimediální texty. Dostupné z WWW: <http://geologie.vsb.cz/svade/Text/7_stabilita.htm>.
- [3] BOUCNÍK, Pavel. *Boucnik.cz* [online]. 2002 [cit. 2011-11-16]. Pavel Boucník. Dostupné z WWW: <<http://www.boucnik.cz/kap6.htm>>.
- [4] *Vsb.cz : studopory.vsb.cz* [online]. 2007 [cit. 2011-11-16]. Vysoká škola báňská. Dostupné z WWW: <http://www.studopory.vsb.cz/studijnimaterialy/Fyzikaprobakalare/PDF/3_06_Magneticke_pole.pdf>.
- [5] SADOVSKÝ, Petr. [Http://fyzika.feec.vutbr.cz/~petsad/](http://fyzika.feec.vutbr.cz/~petsad/) : <http://fyzika.feec.vutbr.cz/~petsad/download/prednasky/> [online]. 2007 [cit. 2011-11-20]. Petr Sadovský. Dostupné z WWW: <http://fyzika.feec.vutbr.cz/~petsad/download/prednasky/14_Gauss.pdf>.
- [6] REICHL, Jaroslav; VŠETEČKA, Martin. *Fyzika.jreichl.com/* [online]. 2006-2011 [cit. 2011-11-20]. Encyklopedie fyziky. Dostupné z WWW: <<http://fyzika.jreichl.com/>>.
- [7] HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. *Fyzika : Elektřina a magnetismus*. Brno; Praha : VUTIUM; PROMETHEUS, 2003. 344 s.
- [8] Doc. Ing. Č Ondrůšek, *Elektrické stroje - laboratorní cvičení, skripta VUT Brno*, 2003. 65 s.
- [9] KONÍČEK, Ing Václav. *Elektrické stroje : Transformátory*. Praha : Vyšší odborná škola elektrotechnická F. Křížka, 2007. 23 s. Dostupné z WWW: <<http://www.vosaspsekrizik.cz/cs/download/studium/vos/el-stroje-a-pristroje/transformatory.pdf>>.
- [10] KOČMAN, Ing. Stanislav. *Asynchronní stroje*. Ostrava : Katedra obecné elektrotechniky FEI VŠB-TU Ostrava, 2002. 27 s. Dostupné z WWW: <<http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske/prednasky/Asynchronni%20stroje-FAST.pdf>>.
- [11] ANSOFT. *User's guide – Maxwell 3D*. Pittsburgh : Ansoft Corporation, 2005. 399 s.
- [12] ANSOFT. *User's guide – Maxwell 2D*. Pittsburgh : Ansoft Corporation, 2011. 565 s.